



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## ZPRACOVÁNÍ ZÁZNĚJE Z DOPPLEROVSKÉHO RADAROVÉHO SENZORU

DOPPLER'S SENSOR BEAT FREQUENCY PROCESSING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN DUŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL FUCHS

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav radioelektroniky**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Martin Dušek

**ID:** 78261

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Zpracování záznamů z Dopplerovského radarového senzoru**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a zpracujte problematiku digitalizace analogových dat a způsob měření rychlosti, založený na Dopplerově principu. Navrhněte zařízení pro zpracování, digitalizaci a přenos získaných dat z radarového senzoru HB410. Zařízení vyrobte a oživte. Získaná data zpracujte programem Matlab nebo programem vlastním a prezentujte výsledky. Ze získaných dat identifikujte cíle a určete jejich radiální rychlosti. Měřením ověřte parametry čidla udávané v katalogovém listu jako například vyzařovací úhel a mezní dosah.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ŠEBESTA, J. Radiolokace a radionavigace. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2003
- [2] JAN, J. Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů. Brno: FEKT VUT v Brně, 1997
- [3] MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry. 1. vyd., Praha : BEN - technická literatura, 2004.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 21.5.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Fuchs

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Martin Dušek  
Bytem: Bukovina nad Labem 56, Staré Hradiště 533 52  
Narozen/a (datum a místo): 2. října 1985 v Pardubicích

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
  - ☒ diplomová práce
  - ☐ bakalářská práce
  - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Zpracování záznamu z Dopplerovského radarového senzoru

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Michal Fuchs

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnožení.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 21. května 2010

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá způsoby měření rychlosti objektů, zejména pomocí Dopplerova jevu. Je zde popsáno čidlo HB410 a možná zpracování výstupního záznamového analogového signálu. Z frekvence záznamového signálu je odvozen výpočet rychlosti objektu.

V práci je navrženo obvodové řešení pro zpracování analogového signálu a jeho digitalizaci. Jsou zde shrnuty dostupné typy a vlastnosti mikrokontrolérů, které zpracovávají číslicový signál a komunikují s PC. V poslední kapitole je popsán ovládací program mikrokontroléru a software do PC pro měření rychlosti.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Dopplerův jev, čidlo HB410, měření rychlosti, AD převodník, mikroprocesor, ATMEGA16, FT232, VCA2618

## **ABSTRACT**

This work is engaged in ways of objects speed measuring mainly helped by Doppler Effect. The sensor HB410 is described in this work and its possible elaboration output heterodyne analog signal. The calculation of objects speed is deduced from frequency of heterodyne signal.

In this work is projected circuit solution for elaboration of analog signal and its digitalization. Available types and nature of microcontrollers which are elaborating digital signal and communicating with PC are summarized in this work. In the last chapter is described microcontroller's driving software and PC software for speed measure.

## **KEYWORDS**

Doppler Effect, sensor HB410, speed measurement, AD converter, microprocessor, ATMEGA16, FT232, VCA2618

DUŠEK, M. *Zpracování záznamů z Dopplerovského radarového senzoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 41 s. 14 s. příloh Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Fuchs.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Zpracování záznamů z Dopplerovského radarového senzoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalovi Fuchsovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>x</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xi</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Měření rychlosti</b>	<b>2</b>
1.1 Senzor pracující na Dopplerově principu .....	2
1.2 Vlastnosti Dopplerova senzoru .....	3
<b>2 Dopplerovský senzor HB410</b>	<b>4</b>
2.1 Parametry senzoru HB410 .....	4
2.1.1 Pokusné měření výstupního napětí čidla .....	5
2.1.2 Pokusné měření vyzařovacího úhlu a dosahu .....	5
<b>3 Digitalizace a zpracování analogového signálu</b>	<b>7</b>
3.1 Zpracování analogového signálu před převodem .....	7
3.2 Vlastní převodník AD .....	8
3.2.1 Parametry AD převodníků .....	8
3.3 Zpracování signálu a komunikace s PC .....	9
<b>4 Navržené řešení</b>	<b>10</b>
4.1 Blokové schéma .....	10
4.2 Filtrace a zesílení .....	10
4.3 AD převod .....	11
4.4 Mikrokontrolér a paměť .....	12
4.4.1 Výběr mikrokontroléru .....	12
4.4.2 Výpočet velikosti RAM paměti .....	13
4.5 Komunikace s PC .....	13
4.5.1 Převodník USART na USB - FT232R .....	14
<b>5 Obvodové řešení</b>	<b>16</b>
5.1 Analogová část .....	16
5.1.1 Obvody filtrace signálu .....	16



5.1.2	Zesilovač s automatickým ziskem .....	23
5.1.3	Celkové schéma analogové části .....	28
5.1.4	Napájení analogové části .....	29
5.2	Číslicová část .....	29
5.2.1	Výběr mikroprocesoru a externích periférií.....	29
5.2.2	Schéma číslicové části .....	30
5.2.3	Vývojový diagram obslužného programu.....	31
5.2.4	Popis obslužného programu pro mikrokontrolér .....	31
5.3	Software do PC .....	34
5.3.1	Popis ovládacích prvků.....	34
5.3.2	Popis vnitřního programu .....	35
5.3.3	Měření odchylek zobrazených hodnot.....	36
<b>Závěr</b>		<b>38</b>
<b>Literatura</b>		<b>40</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>		<b>41</b>
<b>Přílohy</b>		<b>42</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Útlum výstupního signálu v závislosti na úhlu natočení čidla (naměřeno).....	5
Obr. 4.1 Blokové schéma hardwarové části měřiče rychlosti.....	10
Obr. 4.2 Zapojení obvodu FT232RL k mikroprocesoru, převzato z [9].....	15
Obr. 5.1 Zapojení koncového filtru horní propusti se zesílením $A = 11$ .....	16
Obr. 5.2 Schéma filtru dolní propusti 3.řádu – antialiasingového filtru.....	18
Obr. 5.3 Schéma filtru dolní propusti 4.řádu – antialiasingového filtru.....	19
Obr. 5.4 Simulační a měřené schéma filtru v.1 – Pspice, po optimalizaci.....	20
Obr. 5.5 Simulační schéma filtru v.2 – PSpice.....	20
Obr. 5.6 Simulace modulové a fázové charakteristiky filtru v.1 před optimalizací.....	21
Obr. 5.7 Simulace modulové a fázové charakteristiky filtru v.1 po optimalizaci.....	21
Obr. 5.8 Přenosová funkce filtru v.1 – hodnoty naměřené na nepájivém poli.....	22
Obr. 5.9 Simulace modulové a fázové charakteristiky filtru v.2.....	22
Obr. 5.10 Přenosová funkce filtru v.2 – hodnoty naměřené na nepájivém poli.....	23
Obr. 5.11 Blokové schéma zesilovače s automatickým ziskem.....	23
Obr. 5.12 Vnitřní zapojení obvodu VCA2618 – převzato z [14].....	24
Obr. 5.13 Obvodové řešení zesilovače řízeného napětím a usměrňovače.....	26
Obr. 5.14 Obvodové řešení rozdílového zesilovače a filtru dolní propusti (integrátor). ..	27
Obr. 5.15 Celkové schéma analogové části.....	28
Obr. 5.16 Schéma číslicové části zařízení.....	30
Obr. 5.17 Vývojový diagram obslužného programu.....	31
Obr. 5.18 Proces čtení z externí paměti – převzato z [11].....	33
Obr. 5.19 Proces zápisu do externí paměti – převzato z [11].....	33
Obr. 5.20 Vzhled programu v různých situacích.....	34
Obr. 5.21 Závislost odchylky naměřené a očekávané rychlosti na frekvenci.....	37

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Výstupní napětí z filtru, orientační měření .....	5
Tab. 2 Záznějová frekvence pro různé rychlosti objektu.....	11
Tab. 3 Přehled funkcí vybraných procesorů ATMEL viz. [5] a [6]: .....	13
Tab. 4 Popis jednotlivých pinů/portů obvodu FT232RL dle datasheetu [9]: .....	14
Tab. 5 Odchylyk zobrazených a předpokládaných rychlostí.....	36
Tab. 6 Odchylyk rychlosti pro obdélníkový a sinusový signál.....	37

# ÚVOD

Tato práce se zabývá využitím Dopplerovského radarového čidla pro měření rychlosti. Rychlost je fyzikální veličina, která popisuje změnu polohy objektu za určitý čas. Rychlost se může pojmout jako vektorová veličina, popisuje tedy velikost a směr, nebo jako skalární číslo, které popisuje velikost změny dráhy v čase. Existuje mnoho způsobů měření této veličiny, z nichž některé jsou uvedeny v první kapitole. Podrobněji se zabýváme bezdrátovým měřením okamžité rychlosti na krátké vzdálenosti.

Pro měření rychlosti lze využít také radarová čidla, kterých je mnoho druhů a liší se především technologií, cenou a dosahem. Zaměříme se na Dopplerovské čidlo HB410. Toto čidlo se používá především v zabezpečovací technice, avšak po přidání potřebných periférií pro zpracování signálu je možné ho použít též k měření rychlosti.

Úkolem hardwarové části je signál nejprve připravit k digitalizaci. Toto zpracování je čistě analogové a obsahuje filtraci signálu, kde se propustí pouze pásmo, které vyhodnocujeme a zesílení signálu, který má velmi malou úroveň. Po této proceduře následuje analogově číslicový převod a uložení vzorků do paměti.

Konečné vyhodnocení rychlosti je provedeno v počítači. Digitalizovaný signál z čidla, uložený v paměti, se pošle přes komunikační rozhraní do počítače. V PC signál zpracováváme softwarově pomocí programu, který se přímo k tomuto účelu vytvořil. Signál je zpracováván pomocí rychlé Fourierovy transformace a následného vyhledání nejvyšší spektrální čáry. Frekvenční vzdálenost této čáry od nulové frekvence se poté převádí na rychlost, která je zobrazena.

# 1 MĚŘENÍ RYCHLOSTI

Měření rychlosti objektů se provádí mechanicky nebo bezdotykově. Dotykové neboli mechanické měřiče většinou převádějí pohyb na otáčení kola o určitém poloměru. Vydělíme-li obvod kola, které provedlo jednu otáčku, časem otáčení, získáme rychlost objektu. Nevýhoda dotykového měření rychlosti je v nemožnosti měřit objekt na dálku, jelikož mechanické části jsou buď součástí objektu, nebo vlastního měřidla.”

Pro měření rychlosti vzdáleného cizího objektu, který se k nám přibližuje nebo oddaluje, používáme bezdotykové měření rychlosti. Bezdotykové měření objektů elektromagnetickými vlnami spadá do oboru radiolokace. Ta se zabývá detekcí polohy a parametrů pohybu objektu. Zařízení pro tato měření se nazývají radary. Radary lze dále rozdělit na aktivní a pasivní.

Pasivní radary jsou pouze přijímače, citlivé na určité záření (např. radiovou komunikaci, elektromagnetické rušení), které vydává buď objekt samotný, nebo jiné zařízení a od měřeného objektu se odráží. Rychlost a polohu lze určit, pokud je více přijímačů.

Aktivní radar je zařízení vysílající elektromagnetickou vlnu, která se odráží od měřeného objektu a tuto odraženou vlnu přijímá zpět. Přijatá vlna se poté vyhodnocuje a získávají se požadované parametry objektu (např. rychlost). Do této skupiny patří mikrovlnné senzory.

Existují i senzory fungující v jiných oblastech spektra elektromagnetického záření než je radiové, jedná se o např. laserový měřič rychlosti (aktivní, oblast světla), nebo IR senzor (většinou pasivní, detekuje tepelné záření).

## 1.1 Senzor pracující na Dopplerově principu

Zařízení pro měření rychlosti pracující na Dopplerově principu patří mezi bezdotykové aktivní radiolokátory, využívající mikrovlnné záření o konstantní frekvenci.

Senzory využívají tzv. Dopplerova posunu (Dopplerova jevu), který objevil Christian Andreas Doppler (1803-1853). V roce 1845 dokázal, že při vzájemném pohybu pozorovatele a zdroje vlnění se změní vlnová délka vlnění přijímaného pozorovatelem. Frekvence přijímaného signálu se mění s rychlostí přijímače dle (1.1). Při pohybu ke zdroji je přijímaná frekvence vyšší než vysílaná ( $v_{v,p} > 0$ ), při pohybu od zdroje se frekvence se vzrůstající rychlostí snižuje ( $v_{v,p} < 0$ ).

$$f_p = f_v \cdot \left( \frac{v + v_p}{v + v_v} \right), \quad (1.1)$$

$f_p$  – frekvence přijímané vlny,  
 $v_p$  – rychlost přijímače,  
 $v$  – rychlost vln v prostředí.

$f_v$  – frekvence vysílané vlny,  
 $v_v$  – rychlost vysílače,

V případě, kdy rychlost vlny je mnohem větší než rychlost zdroje a vysílače (např. elektromagnetické vlnění), lze vzorec upravit:

$$f_p = f_v \left( 1 + \frac{v_{v,p}}{c} \right) \quad \text{a} \quad v_{v,p} = v_v - v_p, \quad (1.2)$$

$v_{v,p}$  – rozdíl rychlosti mezi přijímačem a vysílačem  
 $c$  – rychlost světla

Je-li přijímač zároveň vysílač (viz. Dopplerovo čidlo), pak lze do (1.2) dosadit  $v_{v,p} = 2 \cdot v$ . Výpočet záznejové frekvence je poté:

$$\Delta f = f_v - f_p = f_v - f_v \left( 1 + \frac{2 \cdot v}{c} \right) = f_v \cdot \frac{2 \cdot v}{c}, \quad (1.3)$$

Rychlost objektu je poté:

$$v = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot f_v}, \quad (1.4)$$

Jak je vidět ve (1.4), je rychlost přímo úměrná velikosti záznejové frekvence (1.5).

$$v = k \cdot \Delta f \quad \text{a} \quad k = \frac{c}{2 \cdot f_v}, \quad (1.5)$$

## 1.2 Vlastnosti Dopplerova senzoru

Frekvence vysílaného signálu u Dopplerovských senzorů jsou standardně na hodnotách 2,45 GHz, 9,35 GHz, 10,525 GHz a 24,125 GHz.

Výhody:

- neovlivňuje je světlo, okolní teplota ani počasí,
- mohou být skryty za nekovovým předmětem (např. za zdí, v plastové krabici),
- mají vyšší citlivost než IR pasivní senzory,
- při více souběžně běžících senzorech lze detekovat i trajektorii pohybu.

Nevýhody:

- nedetekuje předměty, které se nepohybují (někdy lze považovat za výhodu),
- při pohybu pozorovatele ukazuje rozdíl rychlostí objektu a senzoru,
- finančně nákladnější než IR detektory (zabezpečení),
- při pohybu více objektů mohou být některé z nich nedetekovány (nezměřeny).

## 2 DOPPLEROVSKÝ SENZOR HB410

Senzor HB410 je zařízení, které pracuje na Dopplerově principu. Toto čidlo obsahuje dvě antény, oscilátor pracující na frekvenci 9,35 GHz a směšovač. Přijímaný signál se ve směšovači smísí se signálem vysílaným a na výstupu vznikne rozdílová složka frekvencí obou signálů (a další součtové a rozdílové složky násobků těchto signálů), kterou budeme dále zpracovávat. Z Dopplerova principu vyplývá, že tato rozdílová složka bude nulová budou-li okolní tělesa v klidu. Bude-li se některé okolní těleso přibližovat nebo oddalovat, objeví se signál jehož frekvence bude přímo úměrná jeho referenční rychlosti. Amplituda výstupního signálu (vzorků) se bude buď pozvolna zvětšovat, přibližuje-li se těleso, nebo zmenšovat, jestliže se oddaluje.

Toto zařízení lze využít pro detekci pohybu jako PIR čidlo, kde stačí pouze signál frekvenčně upravit (pásmová propust), zesílit a provést komparaci s referenční hodnotou napětí, která určuje zároveň citlivost systému. Dále se dle katalogového listu využívá pro automatické otevírání dveří a rozsvícení osvětlení. Toto čidlo lze využít i jako měřič rychlosti objektů (touto aplikací se budeme zabývat dále). Bohužel je ale jeho dosah relativně malý, cca 10 m a to pro pokrytí jedné místnosti, protože výhradní použití, které výrobce zamýšlel bylo jako čidlo pohybu v bytě (podobně jako PIR detektor).

### 2.1 Parametry senzoru HB410

Z katalogového listu [10]:

Napájecí napětí:	5 V $\pm$ 0,25 V
Proudový odběr:	30 ÷ 40 mA
Pracovní teplota:	-15 ÷ 55 °C
Pracovní kmitočet (vysílací):	9,35 GHz $\pm$ 5 MHz
Vyzařovací výkon EIRP:	10 ÷ 14 dBm
Rušivé vyzařování:	max. -30 dBm
Vyzařovací úhel – vertikálně:	80°
Vyzařovací úhel – horizontálně:	40°
Intenzita přijímaného signálu:	80 ÷ 200 $\mu$ V <sub>p-p</sub>
Vlastní šum:	2 ÷ 3 $\mu$ V

Výstupní parametry jsou udány pro spojitý režim vysílání, teplotu  $t = 25\text{ °C}$ , zátěž na výstupu  $R_L = 12\text{ k}\Omega$  a napájecí napětí  $U_{cc} = +5\text{ V}$ .

### 2.1.1 Pokusné měření výstupního napětí čidla

Měření je pouze orientační, bylo provedeno pomocí lopatky na pásovém posuvníku, která se oddalovala nebo přibližovala z určité vzdálenosti. Amplituda je měřena pomocí osciloskopu, s využitím funkce „SINGLE“, která slouží pro zobrazení jednoho časového intervalu (100 ms) na stínítku osciloskopu. Pomocí kurzorů se poté odečetly hodnoty v Tab. 1. Ačkoliv nejsou výsledky zcela přesné, udávají alespoň hrubou představu o výstupním napětí senzoru v závislosti na jeho vzdálenosti od objektu. Největší odchylka v měření vznikla při odečítání vzdálenosti mezi pohybující se lopatkou a čidlem.

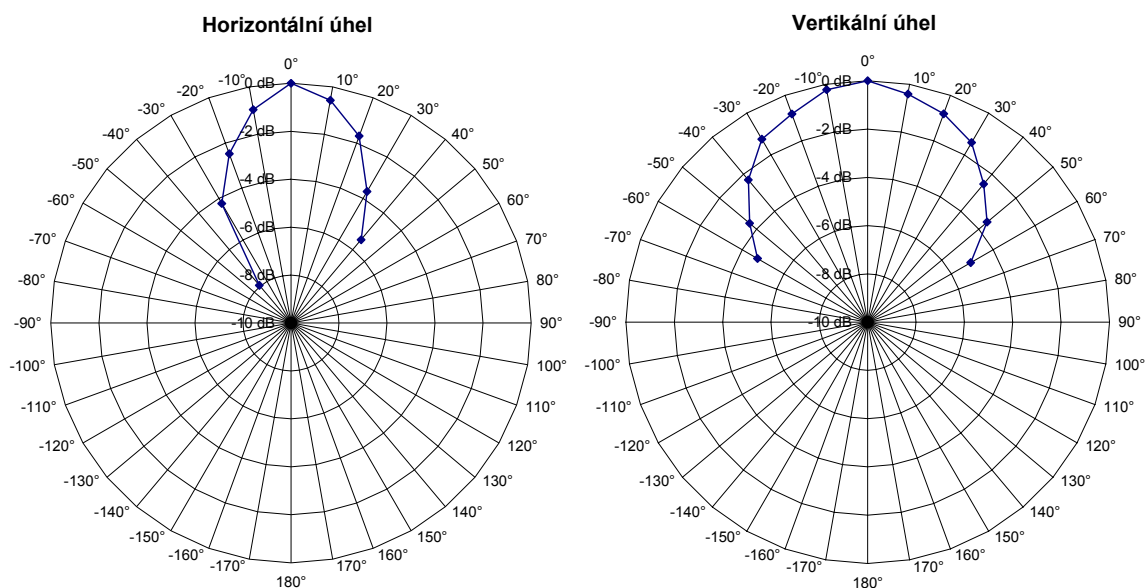
Měření proběhlo za pásmovou propustí prvního řádu ( $B = 10 \text{ Hz} \div 10 \text{ kHz}$ ).

Tab. 1 Výstupní napětí z filtru, orientační měření

Vzdálenost od čidla [cm]	$U_{\text{měř}} [\text{mV}_{\text{p-p}}]$	Zesílení [-]	$U_{\text{čidlo}} [\text{mV}_{\text{p-p}}]$
10	2300	11	209,0
20	890	11	81,0
50	280	11	25,0
100	3500	1001	3,5

### 2.1.2 Pokusné měření vyzářovacího úhlu a dosahu

Toto měření probíhalo podobným způsobem jako měření předchozí, s rozdílem v natáčení čidla na daný úhel. Lopatky se oddalovaly ze vzdálenosti cca 15 cm a odečet je vyhodnocen opět pomocí kurzorů na osciloskopu. Uvedený signál je na výstupu čidla, bez použití přídavného zesilovače. Pro větší přesnost byly provedeny pro každý úhel tři měření a útlum je vypočten z průměru naměřených hodnot. Data k měření obou charakteristik (zobrazených na Obr. 2.1) jsou uvedena v příloze (tabulka v části D.3).



Obr. 2.1 Útlum výstupního signálu v závislosti na úhlu natočení čidla (naměřeno)



Z Obr. 2.1 lze odečíst šířku hlavního laloku antény čidla. Pro vertikální úhel je to asi  $90^\circ$  a pro horizontální asi  $50^\circ$ . Oba výsledky jsou o cca  $10^\circ$  vyšší než kolik udává katalogový list, což lze přisoudit i odchylce orientačního měření.

Maximální dosah čidla, kdy se podařilo zpracovat rychlost pohybu, se pro osobu pohybovala na cca 5 m. Ve větších vzdálenostech byl signál schován v šumu (dle osciloskopu bylo vlastní šumové napětí až 20 mV) a byla detekována rychlost buď nulová, nebo větší než 100 km/h. Pohybující se kovový předmět by bylo možné v případě dobrého odrazu signálu detekovat z větší vzdálenosti. Problémový šum by bylo možné potlačit zúžením pásma vstupních filtrů – např. pro pohyb osob v rozmezí 20 Hz ÷ 200 Hz. Na šumu se podílí i napájení zařízení. Napájením přes USB šum dosahoval hodnot uvedených výše, zatímco pro stabilizovaný zdroj kleslo šumové napětí o více než polovinu (asi 8 mV). Detekce pak byla možná z větší vzdálenosti, ale její nárůst nebyl příliš velký.

### 3 DIGITALIZACE A ZPRACOVÁNÍ ANALOGOVÉHO SIGNÁLU

Abychom mohli signál z čidla vyhodnotit v počítači, nebo v mikrokontroléru musíme ho převést do digitální formy tzv. digitalizovat. Jelikož signál neobsahuje pouze užitečný signál z čidla, ale i jiné naindukované vysokofrekvenční signály a šumy, je nutné nejprve zařadit filtr, který nám propustí pouze požadované pásmo.

Vstupní signál je nutné před vlastním převodem zesílit, protože jak vyplývá z katalogového listu [10], je výstupní úroveň signálu velmi malá (řádově desítky  $\mu\text{V}$  až desítky  $\text{mV}$ ). Protože se výstupní napětí mění se vzdáleností předmětu, zesilovač by měl mít možnost přepínání velikosti zesílení, nebo automatické řízení zisku, aby byl co nejlépe využit napěťový rozsah AD převodníku.

Po úpravě signálu nastává vlastní převod. Ten se realizuje pomocí AD převodníku. Převodníky se liší rychlostí (tj. maximální vzorkovací frekvencí) a rozlišením, uváděným též jako počet bitů (počtem kvantovacích úrovní).

#### 3.1 Zpracování analogového signálu před převodem

Aby byl plně využit rozsah AD převodníku je třeba signál nejprve upravit. Upravuje se zesílení a frekvenční pásmo daného signálu, které nám stanoví maximální a minimální měřenou rychlost.

Frekvenční pásmo se upravuje dle několika kritérií. První kritérium je uživatelské, tj. v jakém pásmu uživatel předpokládá, že se signál bude pohybovat. Druhé kritérium udává přímo vzorkovací frekvence AD převodníku. Dle Shannon-Kotelnikova teorému je nutné, aby vzorkovací frekvence byla minimálně dvojnásobná oproti maximální frekvenci signálu, který je vzorkován. Pokud bychom tento teorém nedodrželi, výstupní signál by se již nedal rekonstruovat. Dolní propust, která má za úkol potlačit signály o vyšší frekvenci, než která je přípustná dle Shannon-Kotelnikova teorému, se nazývá antialiasingový filtr.

Další úpravou signálu před převodem je zesílení (respektive zeslabení). Zesílení neboli zisk (angl. gain) se upravuje pouze je-li to potřeba (tj. v některých aplikacích se upravovat nemusí) tak, abychom využili pokud možno v maximální míře rozsah převodníku. Maximální rozsah se snažíme využít proto, aby chyba převodu byla pokud možno co nejmenší (nulová nebude nikdy, jelikož kvantujeme na předem určené úrovni).

V této aplikaci se vstupní signál mění s polohou předmětu, proto by bylo vhodné zesílení řídit, nebo použít zapojení zesilovače s automatickým ziskem.

## 3.2 Vlastní převodník AD

AD převodník je zařízení, které vytváří z analogového (spojitého) signálu signál číselný (nespojité). Převodník se dělí na části: vzorkování, kvantování a převod kvanta na číslo (dvojkové).

Aby se mohl signál kvantovat musí být nejprve vzorkován. Vzorkování se provádí obvodem typu S/H nebo T/H. S/H je obvod, který při příchodu řídicího signálu uloží aktuální hodnotu napětí, kterou podrží až do příchodu dalšího řídicího signálu. T/H sleduje průběh napětí a jeho hodnotu uloží na výstup, jakmile přijde řídicí signál. Vlastní doba vzorkování by měla být co nejkratší, aby hodnota byla opravdu aktuální a velikost vzorku by měla být nezměněna alespoň do doby dalšího řídicího impulsu. Vzorkovače používají nejčastěji techniku spínaných kapacitorů (SC) a nebo spínaných proudů (SI), nyní využívaných zejména kvůli trendu snižování napájecího napětí.

Pro vyčíslení hodnoty velikosti vzorku je potřeba vzorek kvantovat. Kvantování je proces, kdy je velikost vzorku porovnávána s referenčními úrovněmi a dle těchto úrovní je přiděleno vzorku číslo, které značí jeho velikost. Těmto převodníkům se říká komparační, porovnávající úroveň s referencí. Tato reference může být přímo odvozena z napájecího napětí nastálo (nejrychlejší paralelní převodníky), nebo může být vytvořena jiným obvodem, který referenci mění například D/A převodníkem (kompenzační převodníky).

Posledním krokem je převod kvanta na číslo nejčastěji ve dvojkové soustavě. Jelikož některé převodníky převádí i záporné signály, musí se znaménko zakódovat. Dle [4] se nejčastěji používají tyto dvojkové kódy:

- přímý dvojkový kód – vhodný spíše pro DAC pracující s jednou polaritou,
- dvojkový kód prvního doplňku,
- dvojkový doplňkový kód.

Existuje mnoho druhů převodníků, které se liší svými vlastnostmi a použitím. Nejčastěji používané převodníky pro aplikace, kde není požadována vysoká rychlost převodu (řádově desítky kHz) jsou tzv. sigma-delta převodníky, které se používají převážně v audiotechnice. Jejich výhodou je vysoké možné rozlišení (až 24 bitů). Potřebujeme-li rychlé převodníky, lze použít paralelní nebo řetězové (až GHz). Nevýhoda paralelního převodníku je velký počet komparátorů, tudíž vyšší cena a malé rozlišení, které bývá 8 bitů.

### 3.2.1 Parametry AD převodníků

Parametry AD převodníků dělíme na statické a dynamické. Dle [4] jsou to tyto parametry:

Důležité statické parametry:

- rozsah,
- rozlišení převodníku,
- přesnost,
- chyba nastavení nuly,
- hystereze,
- integrální a diferenciální nelinearita.

Důležité dynamické parametry:

- odstup signál-šum –  $SNR$ ,
- odstup signál-šum a zkreslení –  $SINAD$ ,
- harmonické zkreslení –  $THD$ ,
- šum,
- efektivní počet bitů –  $ENOB$ ,
- dynamický rozsah bez parazitních složek –  $SFDR$ ,
- doba přepnutí,
- doba ustálení.

### 3.3 Zpracování signálu a komunikace s PC

Po převodu signálu na digitální, se musí vzorky uložit a zpracovat. Zpracování probíhá až v PC, kde můžeme zjišťovat rychlost, zrychlení a bude-li mikroprocesor ovládat zesílení předzesilovače, nebo snímat jeho řídicí napětí, lze určit i směr (od čidla, k čidlu).

Číslicový signál, který posílá AD převodník se musí uložit, aby se mohl později poslat do PC. K uložení využíváme paměti RAM, která je velmi rychlá a přepisovatelná. Tyto paměti jsou závislé na napájení, po jeho odpojení se data ztratí. Podle potřebné velikosti paměti volíme, zda bude postačovat integrovaná paměť v mikroprocesoru (SRAM u běžných procesorů má velikost řádově jednotky kByte), nebo bude nutné použít externí paměť.

Pro odeslání uložených vzorků z paměti do počítače, je nutné zajistit komunikaci mikroprocesoru s některým rozhraním počítače. Většina stolních PC nabízí paralelní rozhraní, tj. port LPT, který se dříve využíval především pro komunikaci s tiskárnou, a sériová rozhraní, tj. port COM (RS232) a USB. V dnešní době nejčastěji využíváme rozhraní USB, jelikož je nejrychlejší a v podstatě ho má dnes každé moderní PC.

Pro komunikaci mikroprocesoru a USB rozhraní lze využít převodník FT232, který převádí signál z USB na USART a zpět. Rozhraním USART komunikují mikroprocesory mezi sebou nebo s jinými periferiemi. Některé moderní mikrokontroléry obsahují již v sobě implementované rozhraní USB, tudíž k poslání dat stačí kabel a vhodný program v mikroprocesoru.

Mikrokontrolér řídí tedy vysílání dat v určených intervalech a zajišťuje obsluhu paměti do které se data ukládají. V případě řízeného předzesilovače ještě vykonává funkci sledování velikosti vzorků a řízení jeho zesílení. Jelikož většina dnešních mikrokontrolérů obsahuje integrovaný AD převodník (10 nebo 12 bitový ADC), který má konverzní frekvenci kolem 20 000 vzorků za vteřinu (20 kSa/s), a tak lze využít této vlastnosti a mikrokontrolérem zařídit i vlastní převod.

## 4 NAVRŽENÉ ŘEŠENÍ

Navržené řešení je zobrazeno v blokovém schématu na Obr. 4.1. Podrobněji je popsáno ve čtvrté kapitole.

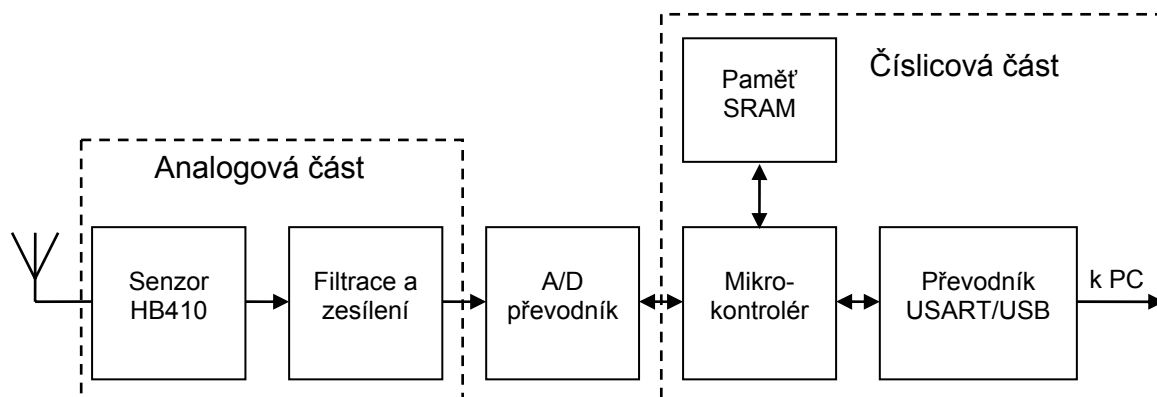
Pro měření rychlosti se použije čidlo HB410. Signál z výstupního konektoru čidla je nejprve nutné frekvenčně omezit a zesílit. Tuto funkci řídí druhý blok s názvem „Filtrace a zesílení“.

Po filtraci převedeme analogový signál na číslicový a uložíme vzorky do paměti. Tyto funkce řídí mikroprocesor, který v sobě zároveň obsahuje AD převodník, který využijeme pro digitalizaci signálu.

Uložené vzorky se dále budou zpracovávat v PC, proto potřebujeme rozhraní, které nám umožní komunikaci mikroprocesoru s PC. To obstarává poslední blok, který může být i integrován v mikroprocesoru, což záleží na jeho typu.

V páté kapitole práce je navrženo obvodové schéma vycházejícího z požadavků ve čtvrté kapitole. Nejprve je rozebrána analogová část, obsahující vstupní filtry a zesilovač s automatickým řízením zisku. Další podkapitoly se zabývají převedením signálu do číslicové formy, uložení vzorků v paměti a následným posláním do osobního počítače a zpracováním v PC.

### 4.1 Blokové schéma



Obr. 4.1 Blokové schéma hardwarové části měřiče rychlosti.

### 4.2 Filtrace a zesílení

Mezní frekvence antialiasingového filtru musí být minimálně dvakrát menší než vzorkovací. Dle Tab. 2, která vychází ze vzorce (4.2), volíme maximální frekvenci tak, aby vyhovovala maximální rychlosti 250 km/h, vypočtenou podle (4.1), tj. frekvenci 4,4 kHz.

Na funkci zesilovače jsou kladeny tyto požadavky. Zesilovač musí mít proměnné zesílení, aby bylo možné sledovat objekty blízké i vzdálené. Změna zesílení by měla být pozvolná, čas přeběhu z minimálního do maximálního zesílení by měl být delší než nejdelší perioda zpracovávaného signálu, aby nedošlo k degradaci signálu. Zvolené zesílení by se mělo přizpůsobit tak, aby amplituda výsledného signálu co nejlépe využila AD převodník. Minimální zesílení AGC a výstupního zesilovače zvolíme dle Tab. 1 a to  $10 \div 20\times$  (tj.  $20 \div 26$  dB). Maximální by mělo být menší než 2,5 milionu (tj. 128 dB), pro vlastní šum  $U_{\text{sum}} = 2 \mu\text{V}_{\text{P-P}}$  a  $U_{\text{OUTAD}} = 5 \text{ V}_{\text{P-P}}$ .

Tab. 2 Záznejšová frekvence pro různé rychlosti objektu

v [km/h]	f [Hz]
1	17,31
2	34,63
5	86,57
10	173,15
20	346,30
50	865,74
100	1731,48
200	3462,96
250	4328,70
500	8657,41

Výpočet maximální teoretické rychlosti, která se bude zpracovávat:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{d_{\text{max cidlo}}}{t_{\text{vzork}}} = \frac{8}{0,1} = 80 \text{ m/s} = 288 \text{ km/h}, \quad (4.1)$$

$d_{\text{maxcidlo}}$  – maximální udávaný dosah čidla v katalogovém listě, tj. vzdálenost kterou může objekt během jednoho měření ujet

$t_{\text{vzork}}$  – doba jednoho měření (pro minimální výstupní frekvenci čidla  $f_{\text{min}} = 10$  Hz)

Záznejšové frekvence, dle vzorce (1.3) pro rychlost  $v = 250$  km/h. Zvolená maximální rychlost blíží se rychlosti  $v$  (4.1):

$$\Delta f = f_v \cdot \frac{2 \cdot v}{c} = 9,35 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot \frac{250}{3,6}}{3 \cdot 10^8} = 4328,7 \text{ Hz}. \quad (4.2)$$

### 4.3 AD převod

Jak bylo již popsáno v úvodu, před samostatným převodem signálu na číslicový je nutné analogový signál zesílit a přeradit mu antialiasingový filtr.

Dle Tab. 2, vzorců (4.1) a (4.2) je navrženo v předchozím bodě, že mezní frekvence antialiasingového filtru bude 4,4 kHz. Podle Shannon-Kotelnikova teorému je

nutné, aby vzorkovací frekvence byla alespoň dvakrát vyšší, tj. AD převodník musí mít kmitočet vzorků minimálně 8,8 kHz. Dle tohoto pravidla volíme tuto frekvenci v rozmezí 10 ÷ 15 kHz.

Protože vzorkovací frekvence je relativně nízká a v aplikaci není potřeba příliš velké množství úrovní, postačí 10 až 12 bitový AD převodník integrovaný v mikroprocesoru.

## **4.4 Mikrokontrolér a paměť**

Požadavky na mikrokontrolér:

- AD převodník alespoň 10 bit,  $f_{vz} > 10$  kHz
- Rozhraní pro komunikaci: USART, nebo USB
- Bude-li potřeba externí RAM, pak alespoň 25 I/O pinů

### **4.4.1 Výběr mikrokontroléru**

V prvním kroku výběru je třeba si ujasnit jakého výrobce preferujeme a následně si na jeho stránkách zobrazíme možné výrobky, které budou splňovat naše požadavky.

Mikrokontroléry firmy Freescale a jeho zástupci MC9S08JM8 [7] a MC9S08JM60 [8], vybraní pro možnou realizaci, jsou velmi dobře hardwarově vybavené (např. 12bit ADC, USB 2.0, velká paměť) a mají oproti vybrané konkurenci příznivou cenu. Nevýhodou je relativně nepřehledná dokumentace a málo literatury o programování a programovacím prostředí těchto mikroprocesorů.

ATMEL je jeden z nejznámějších výrobců mikrokontrolérů. V tabulce Tab. 3 jsou vypsány některé důležité funkce dvou zástupců z této firmy vybraných pro možnou realizaci. Výhodou těchto procesorů je velmi dobře napsaná dokumentace, dostupnost literatury, ve které se těmito procesory zabývají, např. [3] a vývojové prostředí, ve které je vyučováno na této fakultě.

Tab. 3 Přehled funkcí vybraných procesorů ATMEL viz. [5] a [6]:

Procesor	ATMEGA16	ATMEGA16U4
Maximální frekvence (instrukční)	16 MHz	16 MHz
Interní oscilátor	8 MHz	8 MHz
Počet I/O pinů	32	26
Velikost Flash/EEPROM paměti	16 kB/512 B	16 kB/512 B
Velikost interní SRAM	1 kB	2,5 kB
Pracovních registrů	32	32
Integrovaný AD převodník (kanál/bitů)	8/10 bit	12/10 bit
Čítač/časovač počet/bitů	1/16 bit + 2/8 bit	2/16 bit + 2/8 bit
Analogový komparátor	Ano	Ano
Watchdog	Ano	Ano
SPI	Ano	Ano
USART	Ano	Ano
Implement USB výstup	Ne	Ano (USB 2.0)

#### 4.4.2 Výpočet velikosti RAM paměti

Budeme-li uvažovat dobu vzorkování 100 ms (pro  $f_{\min} = 10 \text{ Hz}$ ) :

$$\text{Pro } f_{\text{vz}} = 10 \text{ kHz} \rightarrow C_{\text{pam}} = f_{\text{vz}} \cdot t_{\text{vz}} \cdot 2 = 10 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 2000 \text{ byte}.$$

$$\text{Pro } f_{\text{vz}} = 15 \text{ kHz} \rightarrow C_{\text{pam}} = f_{\text{vz}} \cdot t_{\text{vz}} \cdot 2 = 15 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 3000 \text{ byte}.$$

Z výpočtu je zřejmé, že pro uložení signálu o délce 0,1 s (jedna perioda signálu o  $f = 10 \text{ Hz}$  – nejnižší měřený signál) budeme potřebovat  $2 \div 3 \text{ kB}$  paměti RAM. Takto velkou paměť mají pouze procesory vyšší cenové kategorie (pravý sloupec v Tab. 3), které jsou hardwarově složitější a jejich výbavu bychom zdaleka nevyužili, nebo nejsou dostupné u běžných prodejců. Druhou možností je volba levného procesoru a využití externího RAM modulu.

#### 4.5 Komunikace s PC

Komunikace s PC je velmi podstatná pro další zpracování vzorků, které jsou uloženy v paměti RAM (mikroprocesoru nebo externí). Aby mohla komunikace s PC proběhnout je důležité data poslat po nějakém rozhraní. Dnes nejběžnějším rozhraním je USB (z angl. univerzální sériová sběrnice).

Jak je uvedeno v kapitole 4.3 některé moderní mikrokontroléry již toto rozhraní obsahují, tudíž se o komunikaci postarají po vložení příslušného programu sami. Některé mikrokontroléry (např. ATmega16, ATmega8 a další) však toto rozhraní nemají a tudíž je třeba použít externí periférii. Nejčastěji jsou používány převodníky od firmy FTDI.



### 4.5.1 Převodník USART na USB - FT232R

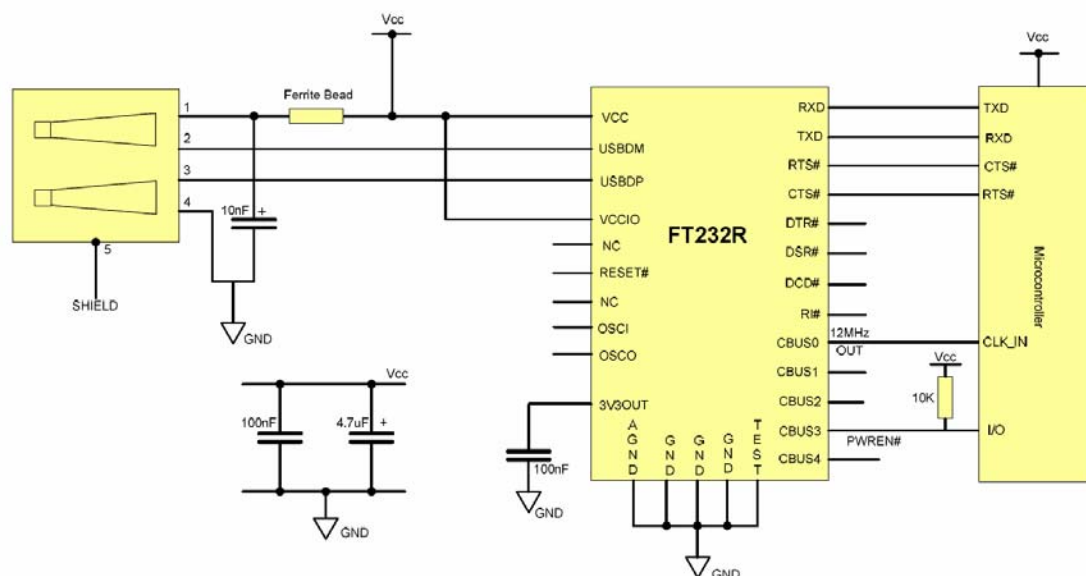
FT232 je obvod, který obsahuje mnoho mutací (značení písmeny na konci názvu). Jednotlivé mutace se liší vnitřním zapojením, pouzdem a potřebou externích součástek.

Novější mutace (např. FT232R) mají již vlastní EEPROM pro identifikaci chipu. Obsahují vestavěný oscilátor s násobičkou a děličkou kmitočtu, ze které lze na některý pin sběrnice CBUS vyvést frekvenci 6 MHz, 12 MHz, 24 MHz a 48 MHz pro taktování dalších periférií, např. mikrokontroléru. Sběrnice CBUS obsahuje i další signály např. /TXLED (indikace vysílání), /RXLED (indikace přijímání), /TX&RXLED (indikace pokud se přijímá nebo vysílá), /SLEEP (úsporný režim).

Zapojení jednotlivých vývodů FT232RL je dle [9] zobrazeno na Obr. 4.2 a popis je v Tab. 4.

Tab. 4 Popis jednotlivých pinů/portů obvodu FT232RL dle datasheetu [9]:

Název (pin/port):	Pin	Popis:
VCC	20	Napájení obvodu 3,3 ÷ 5,25 V
VCCIO	4	Napájení pro USART a CBUS výstupy, 1,8 ÷ 5,25 V
GND	7, 8, 21	Zemnicí piny
AGND	25	Analogová zem – pro interní oscilátor
3V3OUT	17	Výstup z interního stabilizátoru (připojuje se 100nF kondenzátor)
/RESET	19	Pin pro reset, nemusí se využít (uvnitř připojen přes R na VCCIO)
TEST	26	Pro připojení I.C testovací mód – v provozu se zemní
OSCI, OSCO	27, 28	Pro připojení externího 12MHz krystalu, nemusí se využít
USBDP, USBDM	15, 16	Data do USB rozhraní (P - plus, M - minus), úroveň 3,3V
TXD, RXD	1, 5	Vysílání (TXD) a příjem (RXD) dat po USART
/DTR, /RTS	2, 3	Výstupní signály pro RS232
/RI, /DSR, /DCD, CTS	6, 9, 10, 11	Vstupní signály pro RS232
CBUS[0..4]	23, 22, 13, 14, 12	Port CBUS, dle uživatelské konfigurace může plnit více funkcí. Výchozí(0-4): /TXLED, /RXLED, /PWREN, TXDEN, /SLEEP



Obr. 4.2 Zapojení obvodu FT232RL k mikroprocesoru, převzato z [9].

## 5 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ

### 5.1 Analogová část

#### 5.1.1 Obvody filtrace signálu

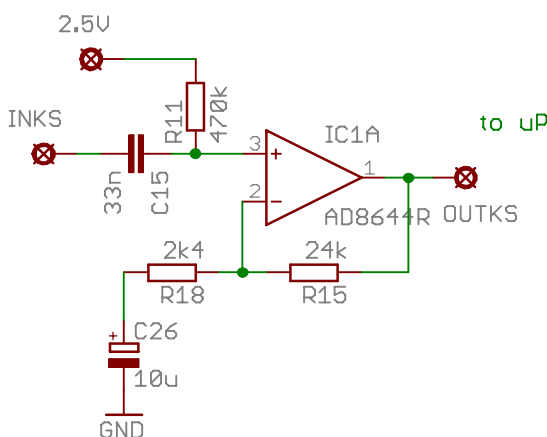
Filtrace se skládá ze dvou filtrů řazených kaskádně, které tvoří pásmovou propust. První část je filtr horní propusti, který zároveň slouží pro stejnosměrné oddělení signálů. Následuje dolní propust třetího řádu, která funguje jako antialiasingový filtr, jeho mezní frekvence je 4,4 kHz.

##### 5.1.1.1 Filtr horní propusti

Jedná se o filtr, který má za úkol především oddělit případné stejnosměrné napětí na výstupu čidla od dalších obvodů. Realizuje se jako nejjednodušší filtr prvního řádu, který je složený z jednoho kondenzátoru a rezistoru (resp. vstupní impedance prvku), tzv. CR člen. Těchto filtrů je v obvodu celkem 5.

První čtyři filtry v signálové cestě jsou součástí obvodu VCA2618 a jejich výpočet je uveden v kapitole 5.1.2.1. Poslední filtr je na výstupu celého analogového systému. Odděluje stejnosměrně filtr dolní propusti s výstupem a offset výstupního signálu posunuje na úroveň 2,5 V. Tento stupeň zároveň zesiluje výstupní napětí, jelikož obvod VCA2618 má maximální rozkmit výstupního napětí  $2,5 \text{ V} \pm 1 \text{ V}$  [14].

Mezní frekvence filtrů pro stejnosměrné oddělení je zvolena  $f_m = 10 \text{ Hz}$ .



Obr. 5.1 Zapojení koncového filtru horní propusti se zesílením  $A = 11$ .

Schéma je zobrazeno na Obr. 5.1. Kondenzátor  $C_{15}$  a rezistor  $R_{11}$  (stejně tak  $R_{18}$  a  $C_{26}$ ) fungují jako filtr horní propusti. Jejich hodnoty jsou vypočítány pomocí vzorce (5.2). Po filtru následuje neinvertující zesilovač. Hodnoty rezistorů  $R_{10}$  a  $R_{11}$  ve zpětné vazbě jsou vypočteny v (5.4).

Výpočet jednotlivých součástí dle [12]:

- Pro filtr platí :

$$f = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (5.1)$$

Vyjádříme-li si z rovnice  $R_{11}$  a zvolíme hodnotu  $C_{15} = 68 \text{ nF}$  pak hodnota rezistoru  $R_{11}$  pro  $f = 10 \text{ Hz}$  bude:

$$R = \frac{I}{2\pi\pi f} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 33 \cdot 10^{-9}} = 482 \text{ k}\Omega \Rightarrow 470 \text{ k}\Omega. \quad (5.2)$$

- Pro zpětnou vazbu neinvertujícího zesilovače platí:

$$K_u = \frac{R_{15}}{R_{18}} + 1. \quad (5.3)$$

Po vyjádření  $R_{15}$  z rovnice, dosazení za  $K_U = 11$  volbě hodnoty  $R_{18} = 2,4 \text{ k}\Omega$ :

$$R_{15} = R_{18} \cdot (K_u - 1) = 2,4 \cdot 10^3 \cdot (11 - 1) = 24 \text{ k}\Omega. \quad (5.4)$$

Minimální kapacitu kondenzátoru  $C_{26}$  vypočteme úpravou (5.1) a dosazením  $R_{18} = 2,4 \text{ k}\Omega$ :

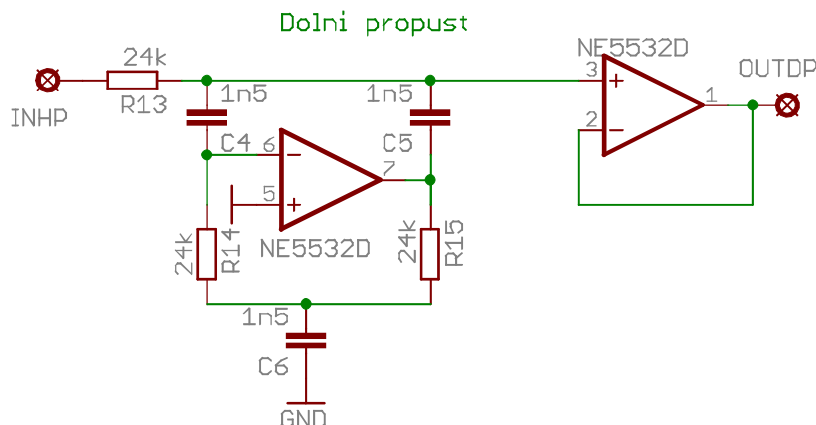
$$C = \frac{I}{2\pi\pi f} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 2,4 \cdot 10^3} = 6,63 \text{ }\mu\text{F} \Rightarrow 6,8 \text{ }\mu\text{F}. \quad (5.5)$$

#### 5.1.1.2 Filtr dolní propusti 3. řádu

Na tento filtr, jelikož má potlačit frekvence vyšší než je polovina vzorkovací frekvence, jsou kladeny vyšší požadavky co se týče strmosti než na filtr první. Proto je zvolen filtr třetího řádu, který by měl být pro naši aplikaci postačující.

Schéma filtru, zobrazeného na Obr. 5.2, je přebráno z [4]. Jedná se o filtr, který není stejnosměrně vázaný na vstupní signál. Pro výpočet jednotlivých prvků byla zvolena Butterworthova aproximace.

Druhý operační zesilovač slouží pro impedanční oddělení signálu, jelikož tento filtr je velmi náchylný na zatížení.



Obr. 5.2 Schéma filtru dolní propusti 3.řádu – antialiasingového filtru

Výpočet jednotlivých prvků pro shodné kondenzátory  $C_4 = C_5 = C_6 = C$  dle [4]:

$$R_{13} = \frac{c_{31}}{2 \cdot C \cdot \omega_m}, \quad (5.6)$$

$$R_{14,15} = \frac{c_{32} \pm \sqrt{c_{32}^2 - 2 \cdot c_{31} \cdot c_{33}}}{c_{31} \cdot C \cdot \omega_m}, \quad (5.7)$$

kde  $c_{xx}$  jsou koeficienty přenosové funkce a lze je nalézt v tabulkách. Tyto koeficienty jsou podle [15]  $c_{31} = 1$ ,  $c_{32} = 2$ ,  $c_{33} = 2$ . Zvolíme-li  $C = 1,5 \text{ nF}$ , je po dosazení do (5.6) a (5.7):

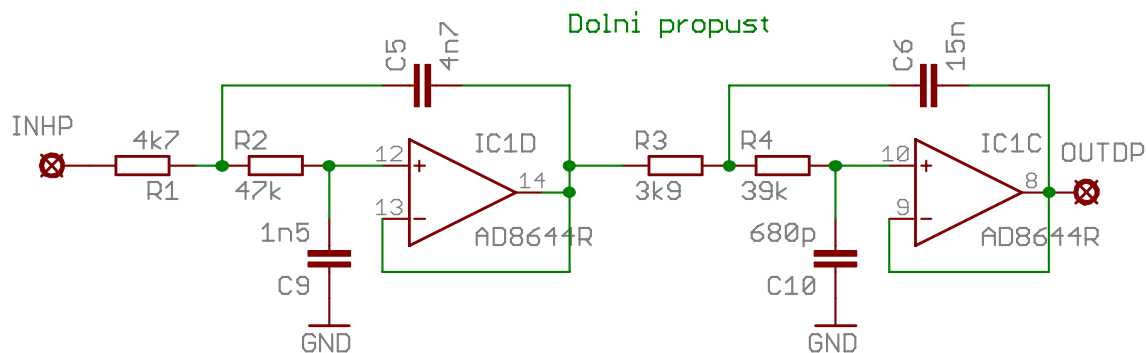
$$R_{13} = \frac{c_{31}}{2 \cdot C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_m} = \frac{1}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 4,4 \cdot 10^3} = 12,1 \cdot 10^3 \Omega = 12 \text{ k}\Omega, \quad (5.8)$$

$$R_{14,15} = \frac{c_{32} \pm \sqrt{c_{32}^2 - 2 \cdot c_{31} \cdot c_{33}}}{c_{31} \cdot C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_m} = \frac{2 \pm \sqrt{2^2 - 2 \cdot 1 \cdot 2}}{1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 4,4 \cdot 10^3} \\ R_{14,15} = 48,2 \cdot 10^3 \Omega = 47 \text{ k}\Omega. \quad (5.9)$$

Po simulaci těchto hodnot vyšel na přenosové charakteristice překmit na  $f = 3,2 \text{ kHz}$ , viz Obr. 5.6. Proto byla pomocí programu PSpice provedena optimalizace. Hodnoty rezistorů po optimalizaci jsou  $R_{13} = R_{14} = R_{15} = 24 \text{ k}\Omega$  a přenosová charakteristika je zobrazena na Obr. 5.7.

#### 5.1.1.3 Filtr dolní propusti 4. řádu (Sallen Key)

Antialiasingový filtr, zobrazený na Obr. 5.3, je na rozdíl od předchozího stejnosměrně vázaný na vstupní signál. Jedná se o filtr čtvrtého řádu, typ Sallen Key s Butterworthovou aproximací, mezní frekvencí  $f_m = 4 \text{ kHz}$  zesílením  $A = 1$  a vstupní impedancí  $Z_{in} = 22 \text{ k}\Omega$ . Pro výpočet jednotlivých prvků byl použit program FilterPro™, dostupný [16].



Obr. 5.3 Schéma filtru dolní propusti 4.řádu – antialiasingového filtru

#### 5.1.1.4 Výsledky simulací a měření filtrů

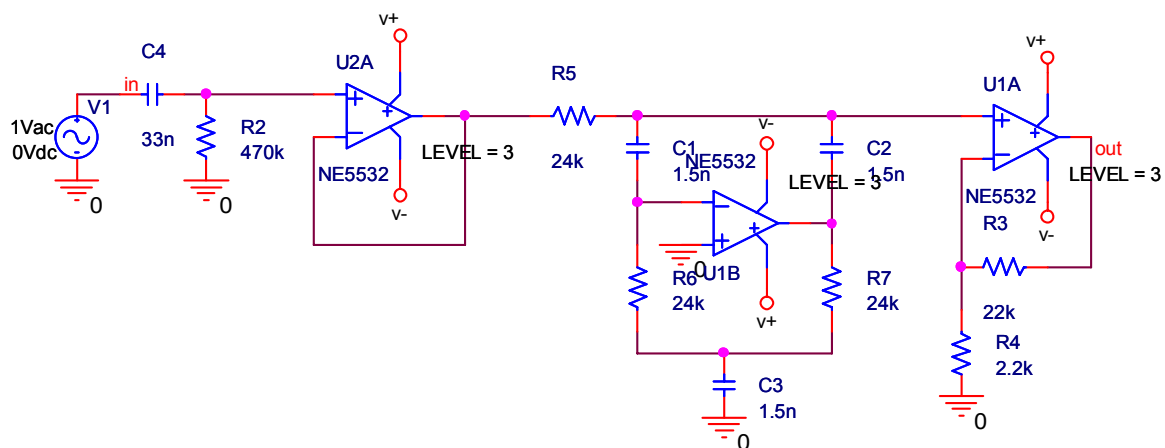
Schéma zobrazené na Obr. 5.4 obsahuje filtr 3.řádu z kapitoly 5.1.1.2, který je označován dále jako „filtr v.1“. Simulace, provedená v programu PSpice, je zobrazena na Obr. 5.7. Vlastní měření je na Obr. 5.8. Jak je z orientačního měření, které probíhalo na nepájivém poli, vidět, výsledky nejsou zcela totožné. I přes vysokou strmost filtru dosahuje měřený vzorek pouze 34,5 dB potlačení „rušivých“ signálů, oproti 67 dB naměřených v PSpice. Dále se mírně liší mezní frekvencí, která je u simulace 4,39 kHz a na vzorku cca 4,2 kHz.

Filtr z kapitoly 5.1.1.3 je označen „filtr v.2“, jeho simulační schéma je na Obr. 5.5. Charakteristiky zobrazené na Obr. 5.9 odpovídají návrhu ( $f_m = 4\text{kHz}$ ). Na Obr. 5.10 jsou naměřené charakteristiky na nepájivém poli. Stejně jako v předchozím případě potlačení vysokých kmitočtů je mnohem nižší než v simulaci, tj. 55 dB místo 120 dB a mezní kmitočet filtru se posunul z hodnoty 4 kHz na 3,5 kHz. Měřený filtr neobsahoval výstupní zesilovač, tudíž jeho přenos v propustném pásmu je o 21 dB menší než v simulovaném modelu a neobsahoval též filtr horní propusti. Potlačení vysokých kmitočtů tohoto filtru je vyšší než u filtru v.1.

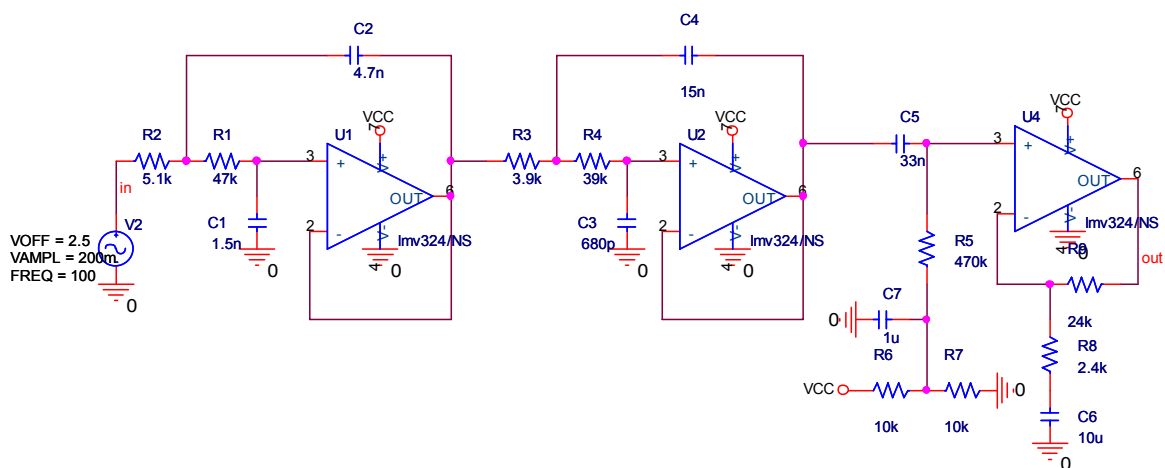
Oba posuny frekvencí jsou zřejmě způsobeny tolerancí součástek, které jsou v PSpice s ideálními parametry. Nedostatečné potlačení signálu je způsobeno i relativně vysokým šumem OZ typu NE5532, kde měřicí přístroj již detekoval spíše šum než vlastní signál. K měření byli použity tyto přístroje:

- Generátor – Agilent 33220A
- Voltmetr – Instek GVT 427B (odečítání přímo v dB)
- Osciloskop – HP 54603B

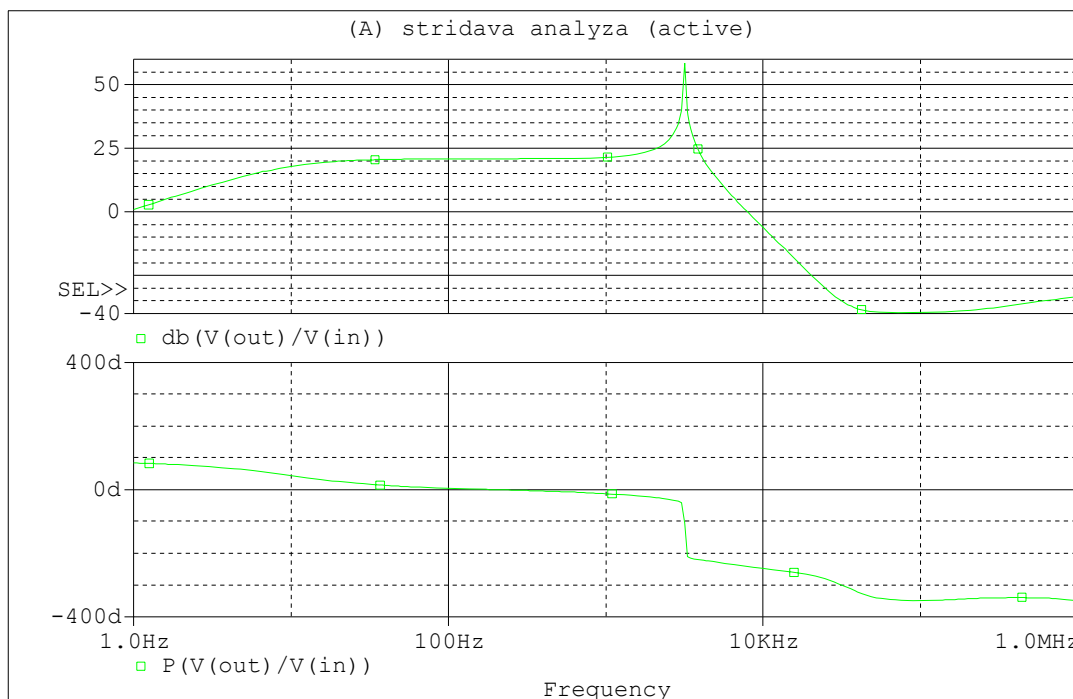
Naměřené hodnoty, ze kterých byly vytvořeny grafy, jsou uvedeny v přílohách (části D1, D2).



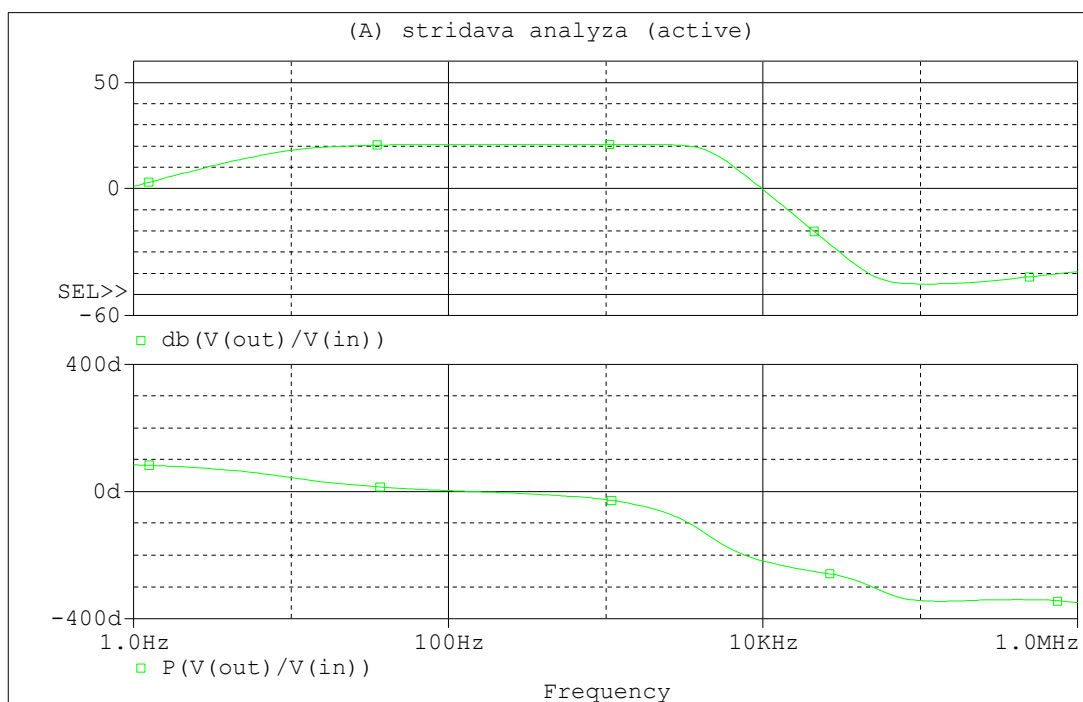
Obr. 5.4 Simulační a měřené schéma filtru v.1 – Pspice, po optimalizaci



Obr. 5.5 Simulační schéma filtru v.2 – PSpice

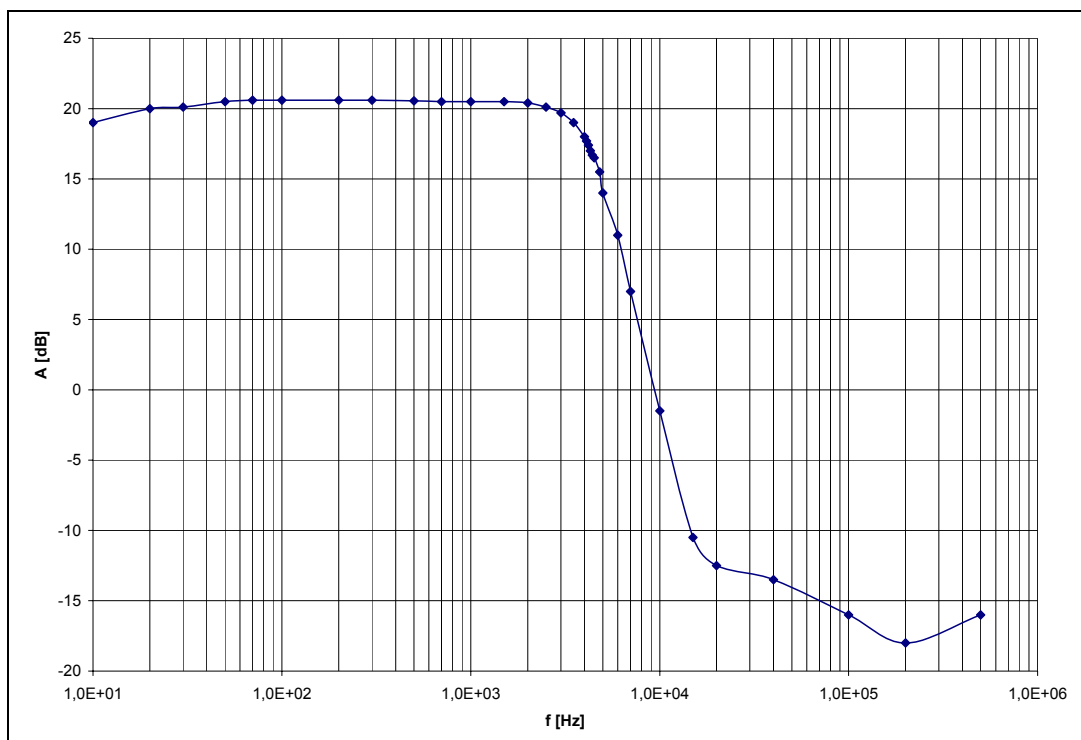


Obr. 5.6 Simulace modulové a fázové charakteristiky filtru v.1 před optimalizací

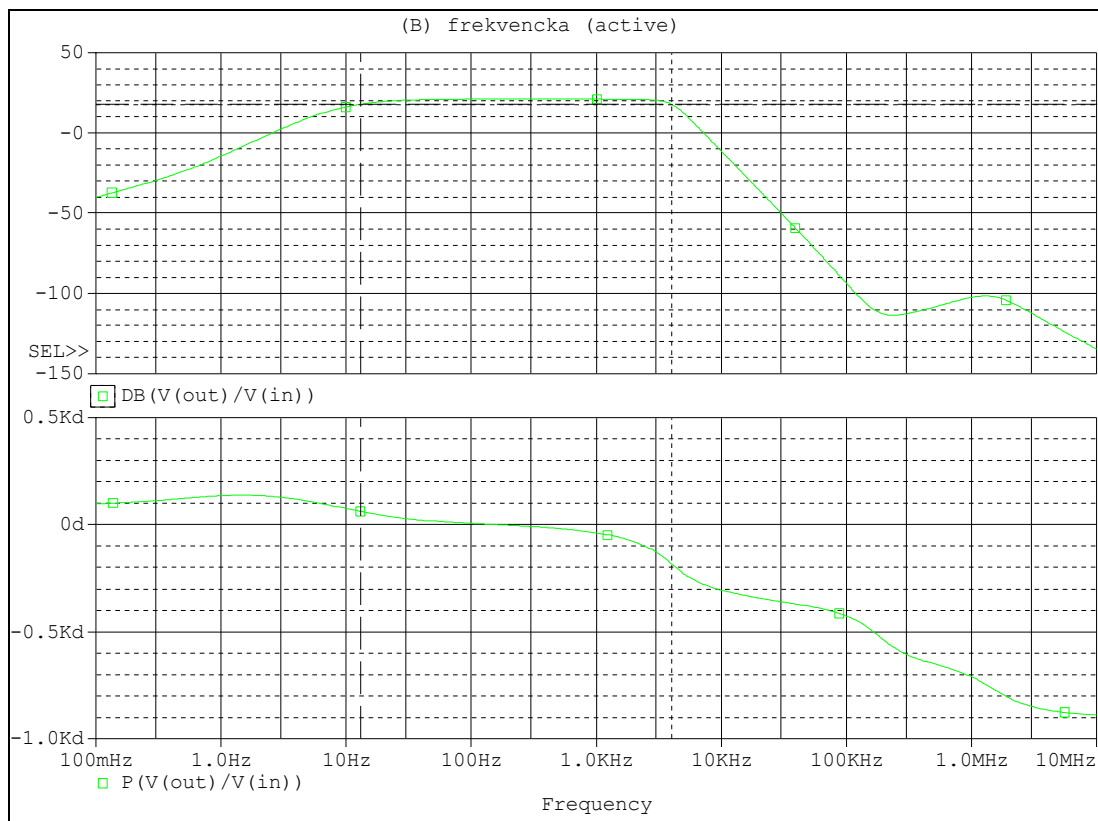


Obr. 5.7 Simulace modulové a fázové charakteristiky filtru v.1 po optimalizaci

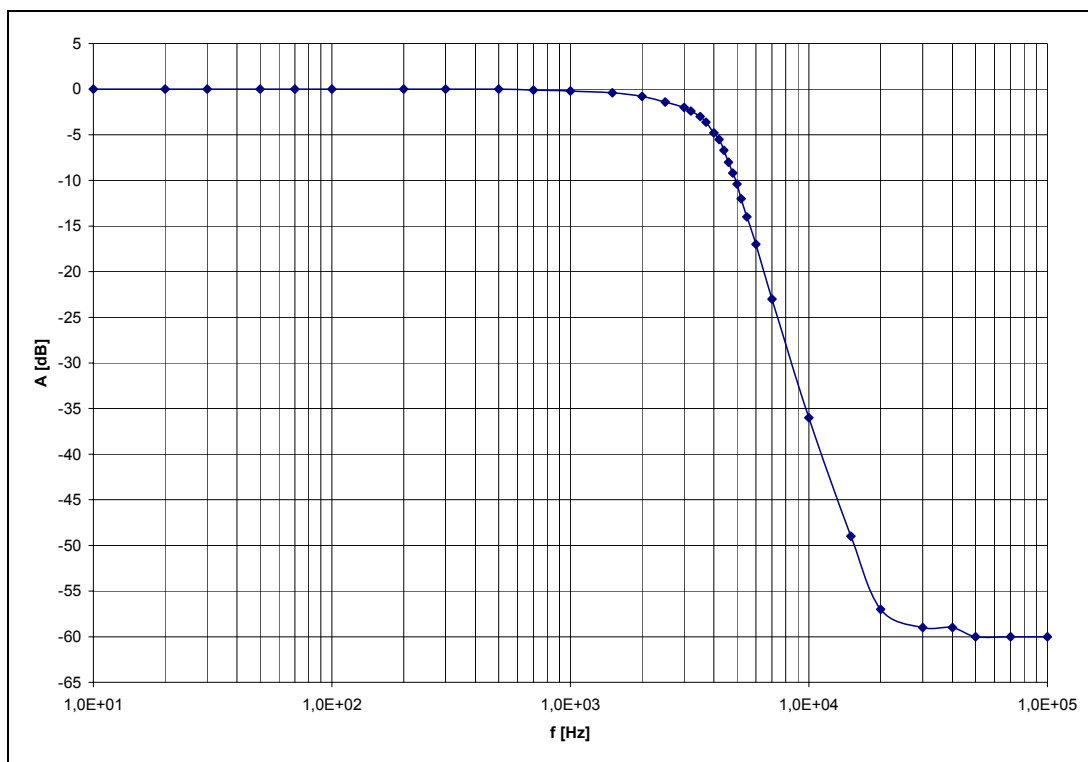




Obr. 5.8 Přenosová funkce filtru v.1 – hodnoty naměřené na nepájivém poli



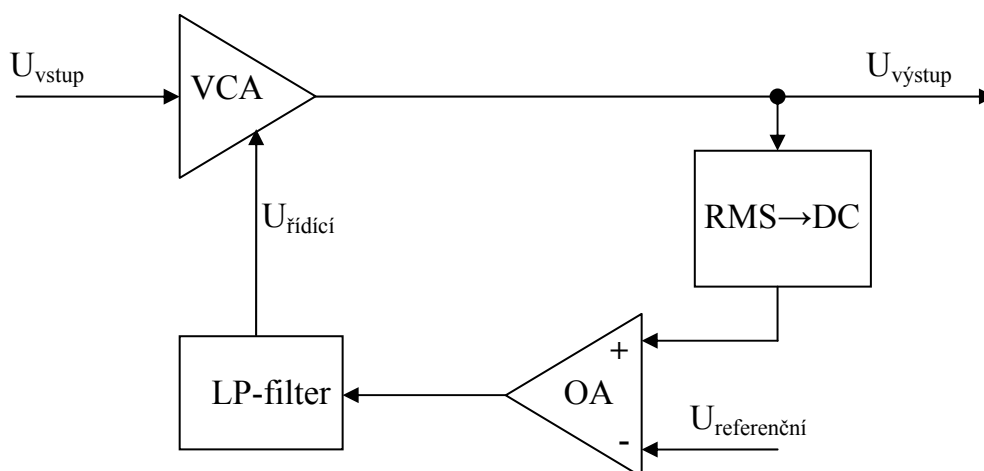
Obr. 5.9 Simulace modulové a fázové charakteristiky filtru v.2



Obr. 5.10 Přenosová funkce filtru v.2 – hodnoty naměřené na nepáživém poli

### 5.1.2 Zesilovač s automatickým ziskem

Tento zesilovač zvaný v literatuře AVC (Automatic Volume Control), nebo AGC (Automatic Gain Control) se skládá ze čtyř bloků, viz Obr. 5.11.



Obr. 5.11 Blokové schéma zesilovače s automatickým ziskem

Prvním blokem je VCA, což je zesilovač s říditelným ziskem pomocí přivedeného napětí. Realizace tohoto bloku je možná např. pomocí speciálních integrovaných

obvodu. Ty mají v sobě integrovaný AD převodník, který má na vstupu řídicí napětí a jeho výstup řídí multiplexer s přivedenými rezistory zpětné vazby operačního zesilovače. Integrované obvody se liší rozsahem AD převodníku, který udává počet možných změn a hodnotami prvku okolo multiplexeru, které udávají rozsah zesílení. Tyto obvody jsou vyráběny např. firmami Analog Devices, nebo Texas Instrument. Druhou možností je čistě analogové řešení pomocí operačního zesilovače a prvku, který dle napětí mění svůj vnitřní odpor, např. optočlen s fotorezistorem, nebo JFET tranzistor.

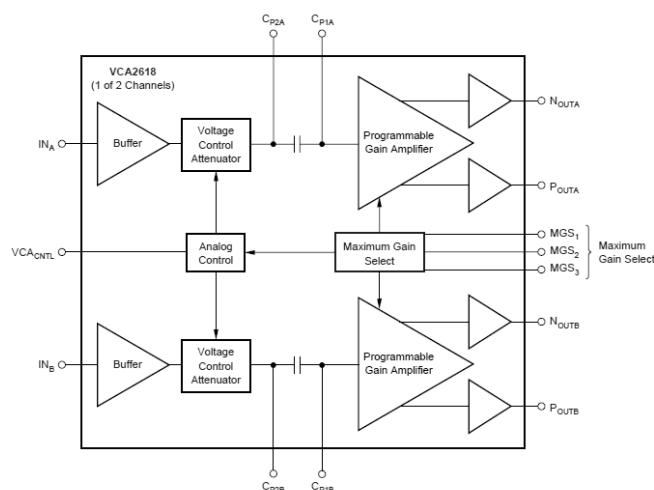
Druhým blokem „RMS→DC“ je detektor špičkového napětí nebo usměrňovač. Na jeho výstupu je buď špičkové napětí výstupní amplitudy nebo efektivní hodnota tohoto napětí. Nejjednodušší řešení je použít diodu jako jednocestný usměrňovač. Klademe-li na toto zařízení vyšší požadavky, např. při zpracovávání signálů okolo menšího jak 1V je nutné použít usměrňovač aktivní. Ten může být jednocestný nebo dvoucestný.

Třetí blok „OA“ je operační zesilovač, který posuzuje aktuální hodnotu napětí s hodnotou referenční. Referenční hodnota udává hodnotu, které chceme na výstupu dosáhnout.

Poslední blok je filtr dolní propusti, který propustí pouze pomalu se měnící signály. Tento filtr určuje rychlost změn zesílení v celém systému.

#### 5.1.2.1 Obvodové řešení VCA a „RMS→DC“ bloku

Pro zesilovač VCA byl vybrán integrovaný obvod VCA2618 od Texas Instrument. Jeho vnitřní zapojení je zobrazeno na Obr. 5.12.



Obr. 5.12 Vnitřní zapojení obvodu VCA2618 – převzato z [14]

Tento obvod obsahuje dva vstupní nízkošumové předzesilovače, značené jako „Buffer“, zajišťující vysokou vstupní impedanci obvodu. Dále jsou v signálové cestě dva napětím řízené atenuátory (zeslabovače), po kterých následují stejnosměrně oddělené zesilovače s nastavitelným zesílením, z nichž každý má dva výstupy, jejichž signály jsou k sobě fázově otočeny o 180° (tzv. symetrický výstup – v nf technice). Maximální zesílení těchto zesilovačů a zároveň maximální útlum atenuátorů lze volit

v rozsahu  $25 \div 43$  dB logickými úrovněmi na vstupech  $MGS_1$  až  $MGS_3$ . Zeslabení attenuátoru řídí napětí na pinu  $VCA_{CNTL}$  (vývod 24), které má být v rozsahu  $0,2 \div 3$  V. Jak je na Obr. 5.12 vidět, vstupy a výstupy oddělovacích kondenzátorů mezi attenuátorem a výstupním zesilovačem jsou vyvedeny ven z pouzdra. Připojením kondenzátorů k těmto pinům lze snížit dolní mezní frekvenci systému.

Každý kanál VCA má své vlastní napájení, které je doporučeno [14] filtrovat 100nF keramickým a 1μF tantalovým kondenzátorem. Stejným způsobem filtrujeme napájení logické a referenční části. Obvod obsahuje navíc výstupy  $V_{CM}$  a  $V_{BIAS}$ , které blokuje stejným způsobem proti zemi. Poslední funkce obvodu je možnost jeho uspání přivedením nízké úrovně na vstup PD.

Výsledné zapojení VCA s usměrňovačem je zobrazeno na Obr. 5.13. Výstup prvního zesilovače je spojen přes oddělovací kondenzátor a jednoduchý filtr dolní propusti se vstupem druhého zesilovače. Tím je docíleno dvojnásobného zesílení systému VCA, tj. maximálně  $0 \div 86$  dB. Jelikož je obvod vybaven symetrickým výstupem, je zvoleno usměrnění pomocí diod  $D_1$ ,  $D_2$  sériově spojenými s rezistorem  $R_{21}$ . Na rezistoru  $R_{21}$  bude tedy úbytek roven střední hodnotě usměrněného špičkového výstupního napětí plus 1,9 V (pro  $U_{AK} = 0,6$  V). Toto napětí přivádíme na porovnávací obvod.

Výpočet kondenzátorů  $C_{12}$  a  $C_{13}$  provedeme dle [14] (úpravou vztahu na str.11):

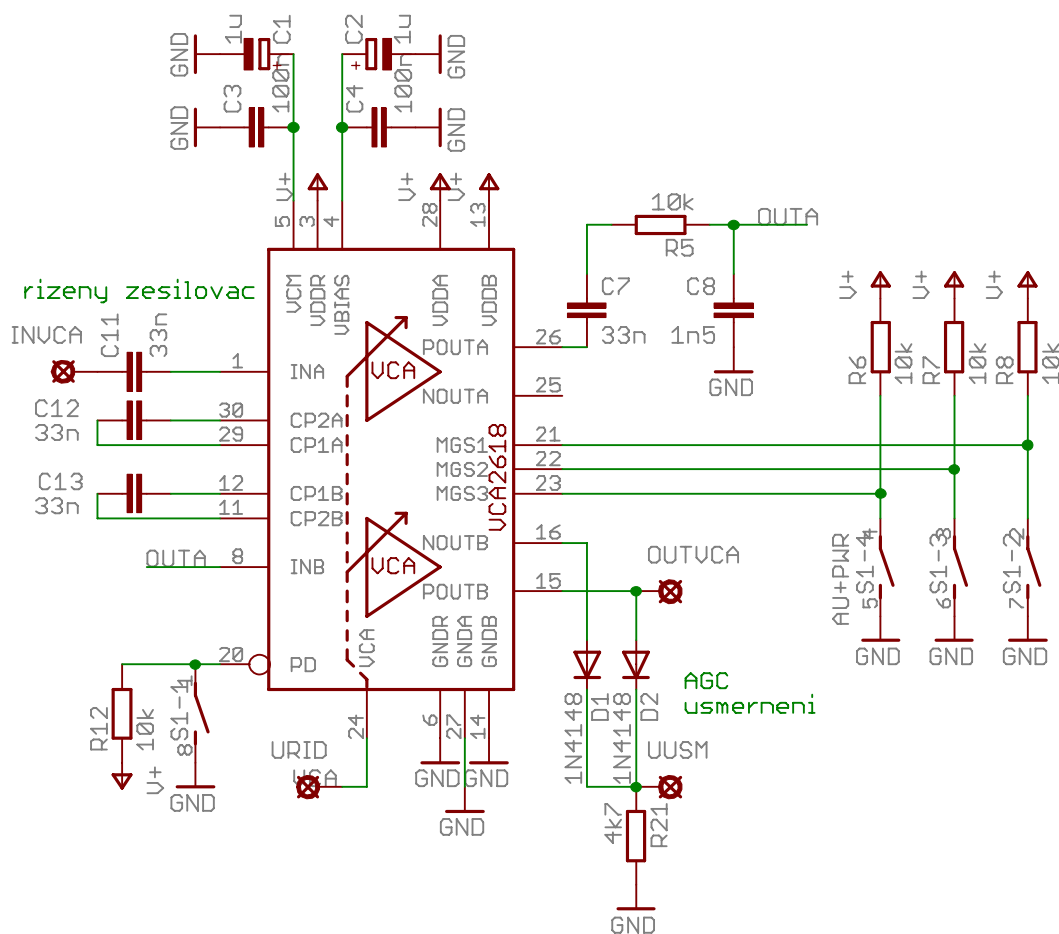
$$\begin{aligned} C_{11} = C_{12} &= \frac{1}{2\pi \cdot f_m \cdot 500 \cdot 10^3} - 220 \cdot 10^{-12} = \\ &= \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 500 \cdot 10^3} - 220 \cdot 10^{-12} = 31,8 \text{ nF} \Rightarrow 33 \text{ nF}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Výpočet kondenzátorů  $C_{11}$  a  $C_7$  provedeme dle (5.1):

$$C_7 = C_{11} = \frac{I}{2\pi \cdot f_m \cdot R_{vst}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 600 \cdot 10^3} = 26,5 \text{ nF} \Rightarrow 33 \text{ nF}. \quad (5.11)$$

Výpočet filtru DP dle (5.1) pro zvolené  $R_5 = 10 \text{ k}\Omega$  a  $f_m = 10 \text{ kHz}$ :

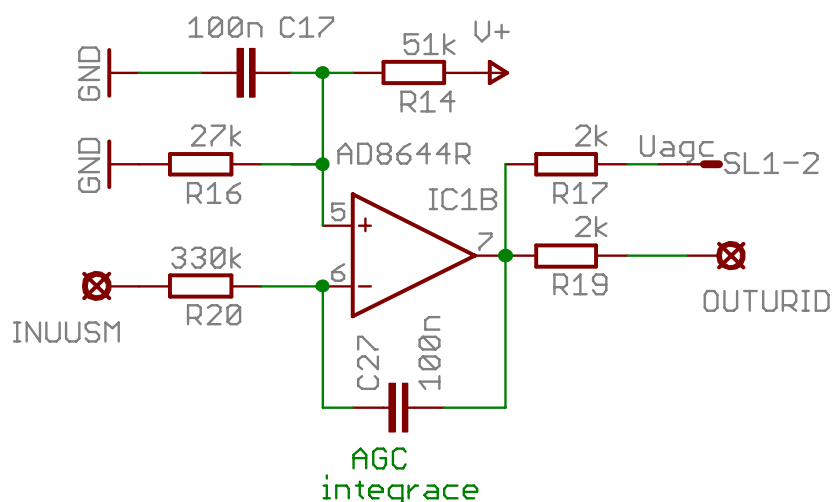
$$C_8 = \frac{I}{2\pi \cdot f_m \cdot R_{vst}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3} = 1,59 \text{ nF} \Rightarrow 1,5 \text{ nF}. \quad (5.12)$$



Obr. 5.13 Obvodové řešení zesilovače řízeného napětím a usměrňovače

### 5.1.2.2 Obvodové řešení rozdílového zesilovače a LP filtru

Tyto dva bloky jsou řešeny pomocí integrátoru (Obr. 5.14), který je „podepřen“ referenčním napětím  $U_{ref} = 2,1 \text{ V}$ , vypočítaným pro rozkmit výstupního signálu VCA2618 na cca  $500 \text{ mV}$ . Integrátor slouží k vytvoření (propuštění) pouze stejnosměrného napětí (střední hodnoty) ze signálu vycházejícího ze dvoucestného usměrňovače. Bude-li na vstupu integrátoru usměrněné napětí o střední hodnotě  $1,6 \text{ V}$  pak na jeho výstupu bude nulové napětí. Pokud je napětí na vstupu vyšší (nižší) než referenční, pak na výstupu bude záporné (kladné) napětí. Napětí na výstupu klesá rychlostí úměrnou rozdílovému napětí na vstupu (5.10).



Obr. 5.14 Obvodové řešení rozdílového zesilovače a filtru dolní propusti (integrátor)

- Výpočet děliče pro referenční napětí:

$$U_{ref} = U_{nap} \frac{R_{21}}{R_{21} + R_9} \quad (5.13)$$

Po úpravě (5.13) a dosazení  $U_{nap} = 5 \text{ V}$ ,  $U_{ref} = 2,1 \text{ V}$  a volbě  $R_{21} = 39 \text{ k}\Omega$  (zvoleno s ohledem na řadu součástek E24):

$$R_9 = \frac{R_{21} \cdot (U_{nap} - U_{ref})}{U_{ref}} = \frac{39 \cdot 10^3 \cdot (5 - 2,1)}{2,1} = 53,8 \cdot 10^3 \Omega \Rightarrow 51 \text{ k}\Omega. \quad (5.14)$$

- Výpočet integračního zesilovače:  
Pro výpočet integrátoru platí základní vzorec integrace:

$$u_{out} = -\frac{1}{R \cdot C} \int u_{in}(t) dt - u_{out}(t_0). \quad (5.15)$$

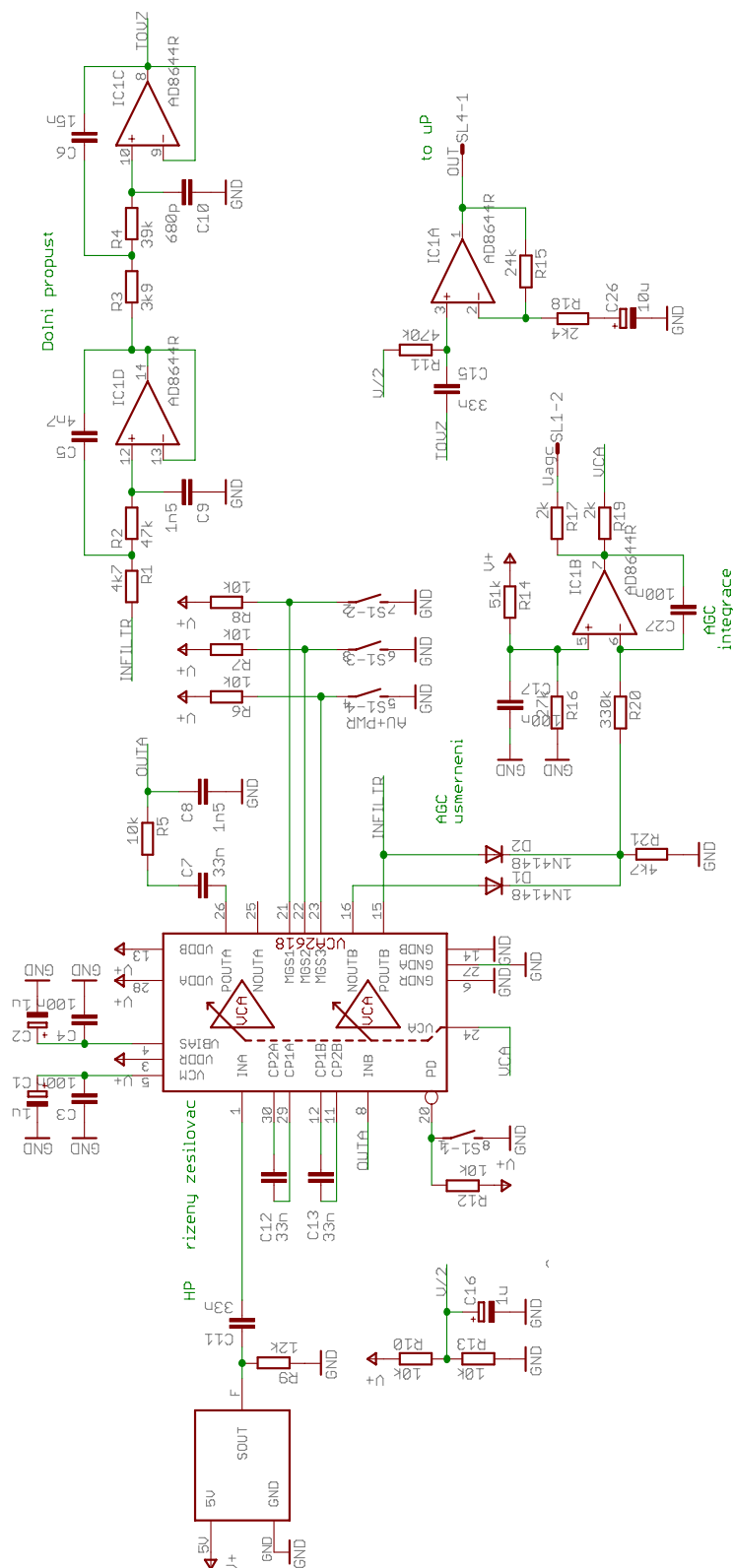
Kondenzátorem protéká konstantní proud (zařizuje OZ) a tak lze vzorec zjednodušit:

$$U_{out}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} U_{in} \cdot t. \quad (5.16)$$

Napětí na výstupu je tedy závislé na časové konstantě obvodu, vstupním napětí a čase. Zvolíme si tedy časovou konstantu, pomocí které vypočteme hodnotu  $R_6$ , zvolili jsme  $C_1 = 100 \text{ nF}$  (keramický kondenzátor z nejvyšší řady vyráběných v SMD):

$$\tau = R \cdot C \rightarrow R_6 = \frac{\tau}{C_1} = \frac{33m}{100n} = 33 \cdot 10^5 \Omega = 330 \text{ k}\Omega. \quad (5.17)$$

### 5.1.3 Celkové schéma analogové části



Obr. 5.15 Celkové schéma analogové části

### 5.1.4 Napájení analogové části

Napájení je pomocí sběrnice USB na PC, která poskytuje připojeným zařízením napájecí napětí 5 V a proud až 500 mA, což je pro naši aplikaci více než postačující. Napájecí napětí této velikosti je ideální zejména pro číslicovou část (mikroprocesor), kterou se budeme zabývat v další kapitole.

Abychom při tomto napájení získali rozkmit výstupního napětí analogové části téměř 5V, je třeba použít operační zesilovače s tzv. RAIL-TO-RAIL výstupem což znamená. Bude-li se i vstupní napětí blížit 5 V nebo 0 V bude třeba využít i RAIL-TO-RAIL vstup.

## 5.2 Číslicová část

### 5.2.1 Výběr mikroprocesoru a externích periférií

Jak je uvedeno v kapitole 4.3, mikroprocesor poskytuje AD převodník, ukládá vzorky do paměti a přes rozhraní USART nebo USB je poté vysílá do počítače. Na mikroprocesor tudíž nejsou kladeny žádné speciální požadavky co se týká periférií, kromě paměti, AD převodníku a rozhraní pro vnější komunikaci.

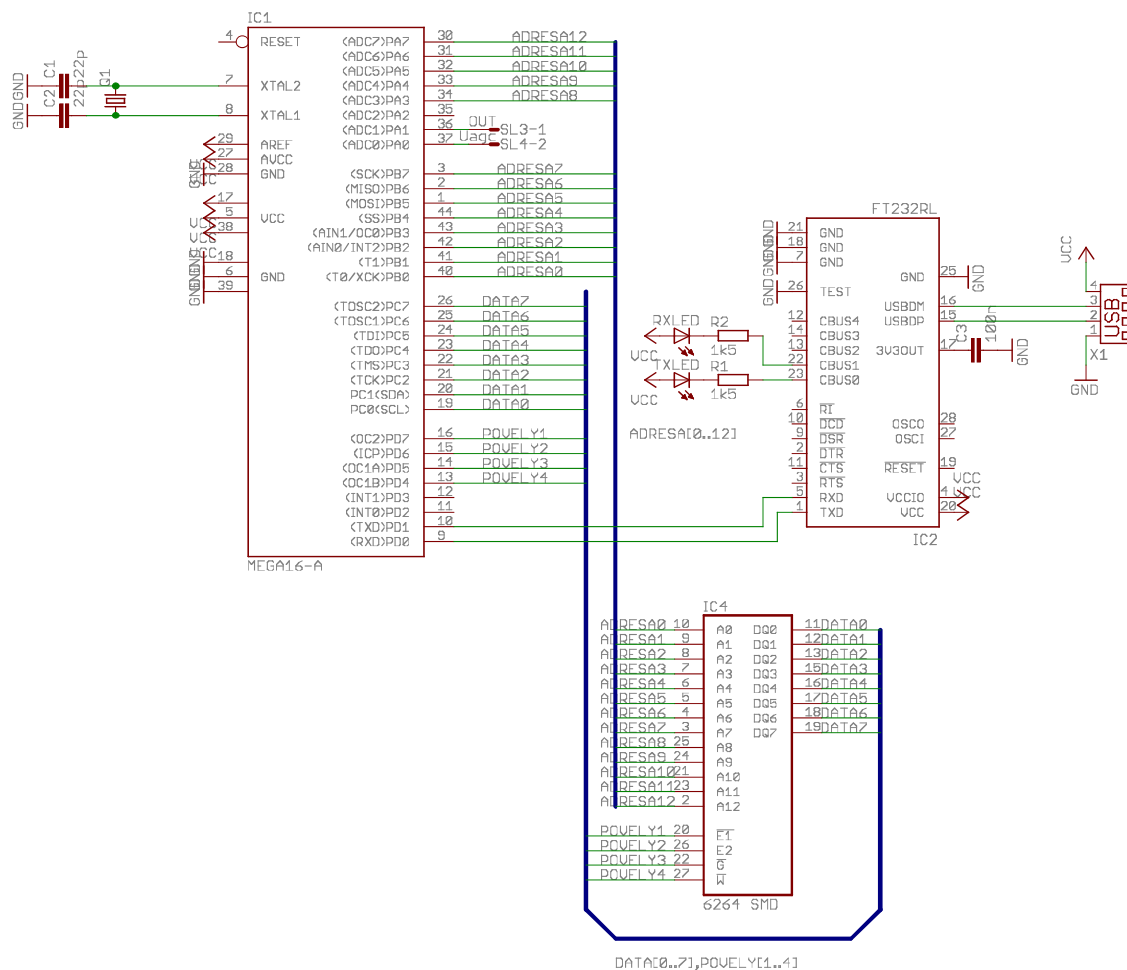
Mikroprocesory s velkou pamětí, alespoň 2,5 kB, jsou buď drahé a pro tuto aplikaci obsahují zbytečně mnoho vnitřních periférií, nebo nejsou jednoduše dostupné. Z těchto důvodů se použije jednodušší procesor s připojenou externí pamětí. Po prozkoumání nabídek společností zabývajících se prodejem elektrosoučástek a hledání vhodné paměti SRAM, je z velmi úzkého výběru vybrána paměť typu „6264LP07 SMD“ s velikostí 8 kB. Pro obsluhu paměti je třeba celkem 25 pinů, z toho 4 piny řídící, 13 pinů adresních a 8 pinů datových, které jsou obousměrné. Zvolený mikroprocesor musí mít po přičtení dvou pinů na komunikaci a dvou pinů pro analogový signál minimálně 29 pinů. Z „levných“ mikroprocesorů firmy Atmel splňuje tuto podmínku ATMEGA16.

V Tab. 3 jsou vypsány nejdůležitější funkce daného mikrokontroléru. Jak je z tabulky zřejmé obsahuje ATMEGA16 10. bitový AD převodník, což je pro naši aplikaci postačující. Neobsahuje však periférii pro komunikaci s PC pomocí USB portu. Z tohoto důvodu je připojen externí převodník USART ↔ USB od firmy FTDI FT232RL. Jednou z výhod tohoto převodníku jsou ovladače do PC, kde lze použít emulaci USB na sériový port, se kterým se lépe pracuje v prostředí Matlab.

Schéma části zabývající se digitalizací signálu a posílání dat do PC je zobrazena na Obr. 5.16. Kromě mikroprocesoru, paměti a převodníku FT232RL jsou na schématu dvě diody, které signalizují komunikaci s PC, a krystal pro řízení taktovací frekvence mikroprocesoru.

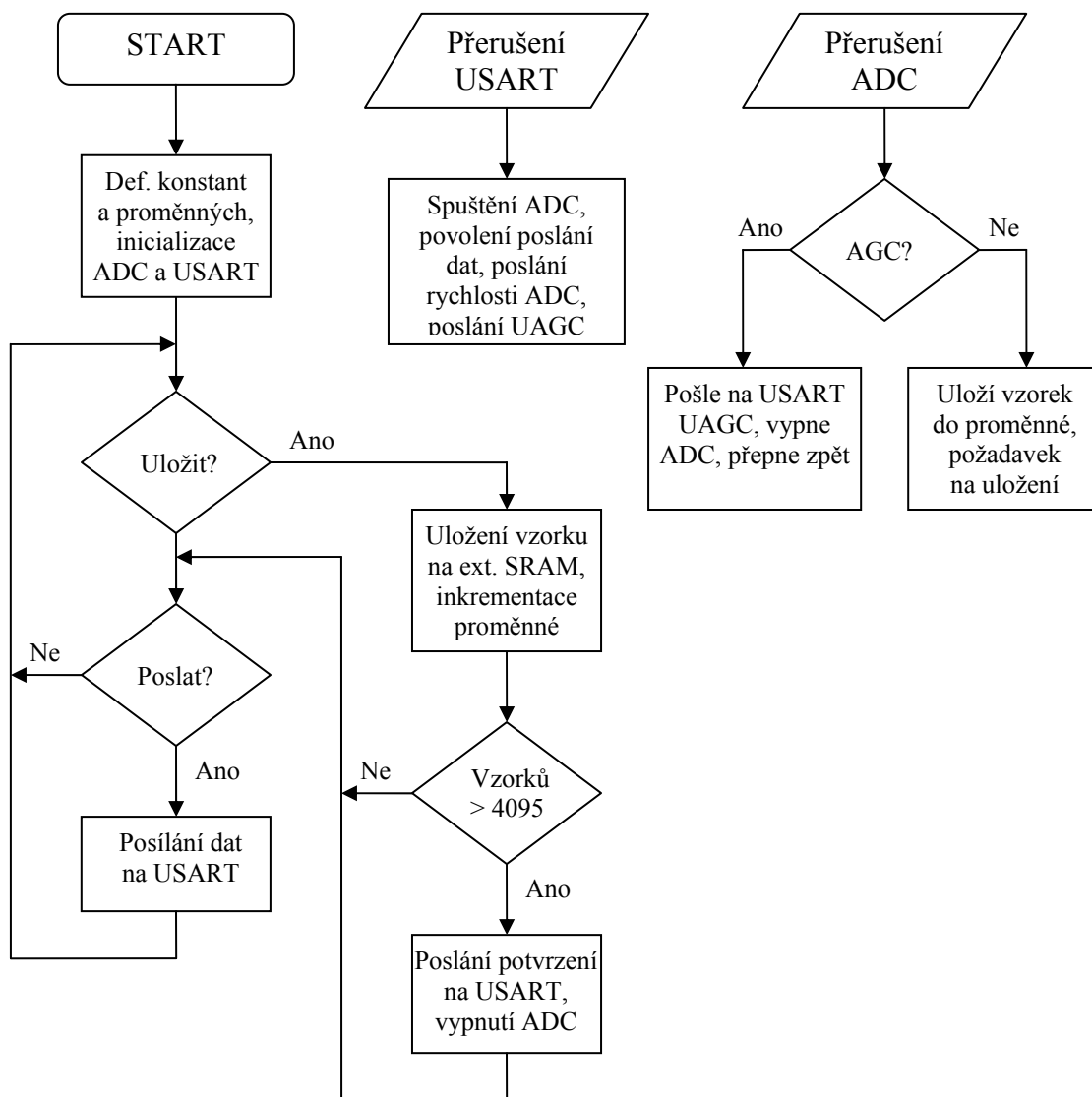


## 5.2.2 Schéma číslicové části



Obr. 5.16 Schéma číslicové části zařízení

### 5.2.3 Vývojový diagram obslužného programu



Obr. 5.17 Vývojový diagram obslužného programu

### 5.2.4 Popis obslužného programu pro mikrokontrolér

Na Obr. 5.17 je zobrazen vývojový diagram programu pro mikroprocesor. Ten využívá primárně dvě vnitřní přerušení. Ta jsou vyvolána buď AD převodníkem po dokončení převodu, nebo USARTem po přijetí paketu vyslaným PC.

Hlavní smyčka programu po inicializaci proměnných a periférií přejde do nekonečné smyčky, kde čeká na požadavek uložení vzorku do paměti, nebo posílání dat do PC. První požadavek zavolá funkci, která uloží hodnotu vzorku z globální proměnné na externí paměť a inkrementuje číslo buňky paměti. Je-li hodnota vyšší jak 4095 (každý vzorek má 2 byte) vypne AD převodník a pošle potvrzovací posloupnost na USART. Druhá podmínka v případě, že je požadavek pro zaslání dat aktivní, pošle

všechna data z paměti na USART. Po dokončení pošle ukončovací znaky „LF“ a „CR“ a vynuluje proměnnou s požadavkem.

Přerušení AD převodníkem nejprve sleduje, je-li zde požadavek na změření napětí AGC. Pokud ano, vypne převodník, změřené napětí pošle na USART, vynuluje požadavek a přepne druhý vstup. V druhém případě se vzorek uloží do globální proměnné a povolí se uložení.

Po přerušení USARTem podprogram vyhodnotí o jaký příkaz se jedná. Písmeno „s“ spustí AD převodník, „p“ povolí posílání dat do PC, „r“ pošle na USART rychlost převodu, „a“ spustí měření napětí AGC a „?“ pošle zpět do PC posloupnost pro ověření. Po rozpoznání příkazu se provede příslušná změna v I/O registrech mikroprocesoru.

Program se skládá ze dvou souborů. První se jmenuje „ovladac.c“ a obsahuje tyto funkce a makra.

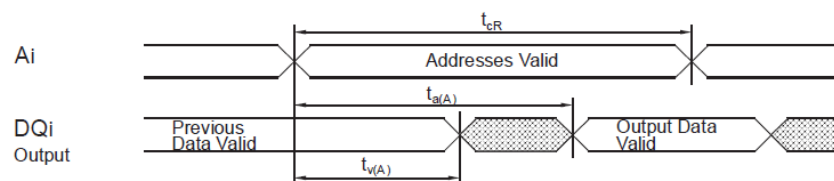
- WENABLE – makro pro zahájení zápisu do paměti,
- WDISABLE – makro pro ukončení zápisu do paměti,
- DATAI – makro pro čtení z paměti (čtení z portu C),
- DATAO – makro pro zápis do paměti (zápis na port C),
- ADC\_init (unsigned int f\_ADC) – inicializace AD převodníku,
- ADC\_run (void) – spuštění AD převodníku,
- USART\_init(int f\_prenos) – inicializace USARTu,
- nastav\_vstup (uint8\_t vstup) – nastavení vstupu AD převodníku,
- memory\_init (void) – nastavení portů pro ovládání paměti,
- zapis (void) – nastavení signálů pro zápis do paměti,
- cteni (void) – nastavení signálů pro čtení z paměti,
- adresa (unsigned int adr) – nastavení adresy paměti.

Druhý soubor „dopplermikroP.c“ obsahuje vlastní program. Využívání funkcí a maker z prvního souboru je zvoleno pro přehlednější zápis a v případě upravení hardwaru zařízení lze jednodušeji a přehledněji změnit program. Hlavní program se skládá z těchto částí.

- Main (void) – hlavní smyčka programu,
- ISR(ADC\_vect) – zpracování přerušení AD převodníku,
- ISR (USART\_RXC\_vect) – zpracování přerušení při příjmu dat na USART,
- zapis\_vzorek (void) – funkce pro zápis vzorku do paměti.

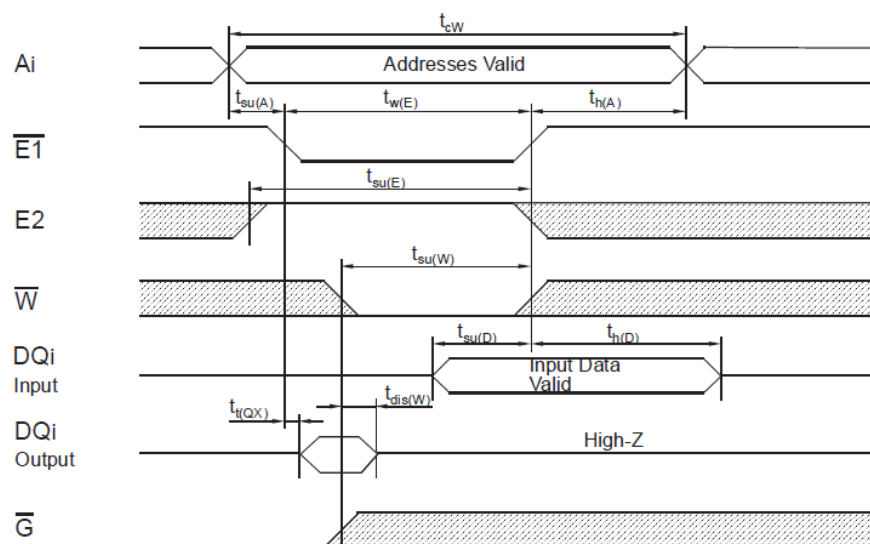
Procedura pro zápis a čtení z externí paměti je provedena dle katalogového listu [11]. Pro čtení je třeba nastavit vstupy dle Obr. 5.18. Jsou-li ovládací piny správně nastaveny, pak se po době 70 ns od zadání adresy buňky nastaví na datových pinech uložená data. Nastavení ovládacích pinů pro zápis je zobrazeno na Obr. 5.19. Před zápisem musí být pin /E1 ve stavu „log 1“. Nejprve se nastaví adresa buňky, následuje shoení bitu /E1, zapsání dat na výstupní port a v dalším strojovém cyklu /E1 překlopíme zpět na vysokou úroveň. Šrafovaná pole v Obr. 5.18 a Obr. 5.19 znamenají, že na logické úrovni v této době nezáleží, čehož program využívá a nechává je beze změny. Z rozboru je zřejmé, že zápis je strojově o mnoho delší než čtení. Toto nám nevadí, jelikož mikrokontrolér má daleko více strojového času pro zápis ( $f_v = 14,4 \text{ kHz}$ ) než při vyčítání ( $R = 250 \text{ kBaud}$ ).

Read Cycle 1 (during Read cycle:  $\overline{E1} = \overline{G} = V_{IL}$ ,  $E2 = \overline{W} = V_{IH}$ )



Obr. 5.18 Proces čtení z externí paměti – převzato z [11]

Write Cycle 2 ( $\overline{E1}$ -controlled)

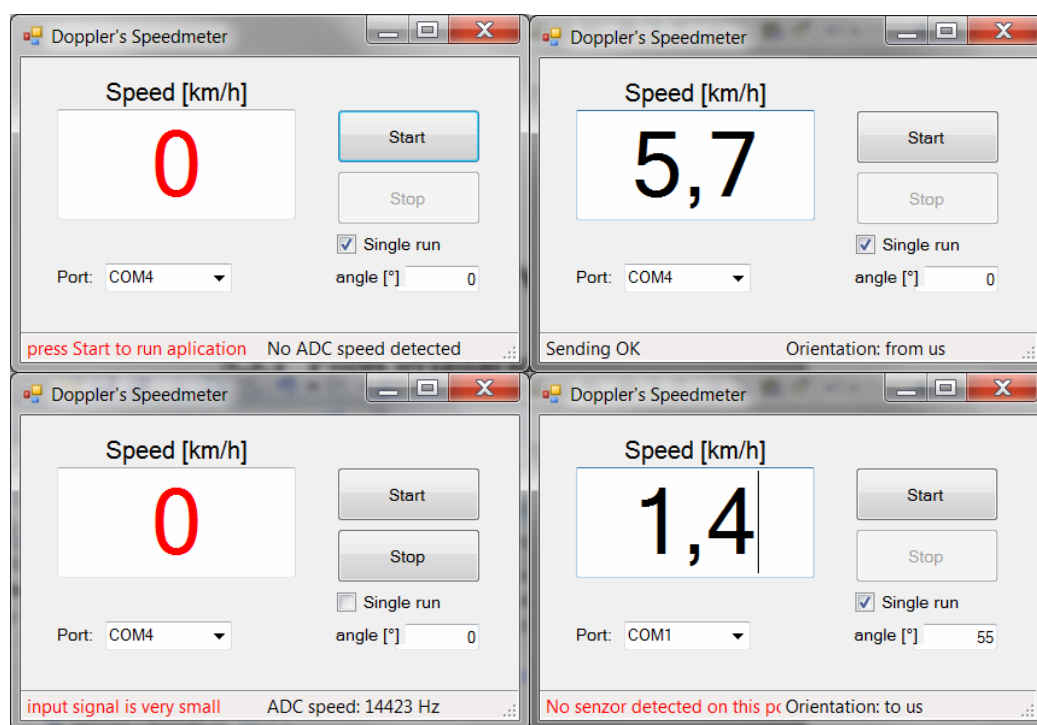


Obr. 5.19 Proces zápisu do externí paměti – převzato z [11]

## 5.3 Software do PC

Je napsán v programovacím jazyku C# ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2007, získaného z MSDN Academic Alliance (poskytován pro studenty zdarma).

### 5.3.1 Popis ovládacích prvků



Obr. 5.20 Vzhled programu v různých situacích

Program obsahuje dvě tlačítka, ukazatel rychlosti, nabídku portů, pole pro výběr četnosti měření a pole pro zadání korekčního úhlu.

Tlačítko „Start“ spustí rutinu pro měření. V případě že je zaškrtnuto políčko „Single run“ zobrazí se výsledek pouze jednoho měření a tlačítko „Stop“ není aktivní. V případě nezaškrtnutí „Single run“ je aktivní i tlačítko „Stop“, kterým lze po startu zamezit dalšímu měření, ta se jinak do nekonečna opakují.

Do políčka „angle“ zadáváme korekční úhel ve stupních, ten se do proměnné ukládá po startu měření. Na vysouvacím menu „Port“ lze zvolit port pro přenos dat, pomocí kterého zařízení komunikuje. Po spuštění je tento prvek zakázán, aby nedocházelo ke kolizím.

Textové okno s názvem „Speed [km/h]“ zobrazuje rychlost. V případě, že vstupní signál nemá určitou amplitudu, zobrazí se červená „0“ a ve stavovém řádku se objeví popis „input signal is very small“. Hodnota zde zůstává do přepsání další hodnotou. Stavový řádek nalevo udává informace o stavu měření a o případných detekovaných chybách, napravo je zobrazena rychlost AD převodu, nebo směru, ten je detekován pouze pomocí změny zesílení AGC.

### 5.3.2 Popis vnitřního programu

Po stlačení tlačítka „Start“ se nejprve převede obsah pole pro korekční úhel na korekční hodnotu pomocí matematické funkce `cosinus`. V případě, že není údaj v poli korektní je spuštěno vyskakovací okno, které na tuto skutečnost upozorní a dále se počítá s nulovým úhlem. V dalším kroku se spustí nové vlákno, které běží na pozadí a obstarává celou rutinu samostatně. Toto je zvoleno, aby bylo možné používat prvky formuláře i během přenosu dat, jinak by formulář „zamrzl“. Vlákno je voláno funkcí:

```
Thread datain = new Thread(PoStartu);  
...  
datain.Start();
```

Po spuštění vlákno nastaví sériový port a zakáže některé ovládací prvky ve formuláři. Dále otevře sériový port, vysílá příkazy a čeká na potvrzení nebo data. Příklad pro proceduru zjištění rychlosti.

```
if (!serialPort1.IsOpen)           //je-li port zavřen  
    serialPort1.Open();           //otevře port  
...  
serialPort1.Write("r");           //vyšle příkaz pro rychlost ADC  
while (serialPort1.BytesToRead < 2)  
    Thread.Sleep(1);              //čekání na příjem odpovědi  
rychlostAD = cti();               //funkce pro čtení  
Data se čtou po dvou byte, slouží k tomu funkce „cti()“:  
  
UInt16 cti()  
{  
    byte[] mala = new byte[2];    //alokace paměti  
    if (serialPort1.BytesToRead >= 2) //podmínka dvou bytů ke čtení  
    {  
        serialPort1.Read(mala, 0, 2); //přečtení dvou bytů  
        return (BitConverter.ToUInt16(mala, 0)); //spojení dvou bytů  
    }  
}
```

Příkazy pro mikrokontrolér jdou za sebou následovně. Nejprve se vyšle kód pro zobrazení rychlosti, následuje nekonečná smyčka obsahující příkaz pro zjištění napětí AGC, spuštění převodu, příjem dat z MCU, zpracování dat (do MCU se nic nevysílá) a opět napětí AGC. Tuto smyčku lze po provedení posledního příkazu přerušit zmáčknutím tlačítka „Stop“ nebo zaškrtnutím pole „Single run“. Pokud pole bylo zaškrtnuté před startem vykoná se smyčka pouze jednou. Po zpracování dat a zjištění rozdílu napětí AGC dojde k vypsání rychlosti a směru do ovládacího okna. Po zobrazení se ještě povolí zakázané ovládací prvky a úloha vlákna končí. Aby byl uživatel informován o stavu procesu jednotlivé kroky se zobrazují na stavovém řádku vlevo.

Jelikož se vývojové prostředí brání zapisovat do formuláře ze zavolaných vláken je nutno použít funkci pro zápis s příkazem „Invoke“, zde je příklad zápisu pro zapsání stavu do lišty:

```
void zapisStav(string stav, bool cervena)  
{  
    if (statusStrip1.InvokeRequired)  
    {  
        statusStrip1.Invoke(new MethodInvoker(delegate()  
        {  
            zapisStav(stav, cervena);  
        }));  
        return;  
    }  
}
```

```

label1.Text = stav;
if (cervena) label1.ForeColor=Color.Red;
else label1.ForeColor=Color.Black;
}

```

Vlastní funkce pro zpracování FFT je převzata z programu „SciMark2a“ [17] vytvořeného pro benchmark procesoru (zjištění výpočetní rychlosti). Funkce pro FFT pracuje tak, že na vstupním poli dat ve formátu double (v programu má název „serialPrecteno“) provede vlastní funkci a výsledné hodnoty zapíše do tohoto pole. Zapisuje to ve formátu, kdy jedno číslo je reálná část a druhé číslo je imaginární část čísla. Jelikož se frekvenční spektrum je od 0 Hz po  $f_{vz}$  je výstupní funkce středově souměrná (pro absolutní hodnotu čísla), můžeme tudíž použít pouze jednu polovinu funkce. Z původních 8192 bytů, které mikrokontrolér vyslal, je tedy 4092 vzorků, které po spuštění FFT dají 2048 komplexních čísel. Pro určení rychlosti můžeme použít pouze polovinu a tudíž na daný frekvenční rozsah máme pouze 1024 vzorků což nám velmi snížilo rozlišovací schopnost.

Zjištění rychlosti spočívá v najetí maximální absolutní hodnoty komplexního čísla, jehož index ukazuje (po vynásobení  $f_{vz}$  a vydělením počtem vzorků minus jedna) frekvenci zázněje. Tu následně násobíme konstantou, která vychází ze (1.5) a výsledek je roven rychlosti. Rozlišovací schopnost systému je dle (5.17) asi 3,5 Hz, tj. 0,2 km/h. Aby se zamezilo detekování šumu, vyhodnocuje se nejprve rozdíl minima a maxima navzorkovaného signálu. Toto číslo musí mít určitou úroveň (např. 5 kvantizačních úrovní), aby program začal počítat FFT, jinak se zobrazí varování ve stavovém řádku a rychlost je dána jako 0.

Výpočet rozlišovací schopnosti systému pro  $f_{vz} = 14423$  Hz a  $N = 4096$ :

$$\Delta f_{KROK} = \frac{f_{vz}}{N-1} = \frac{14423}{4096-1} = 3,52 \text{ Hz} . \quad (5.17)$$

### 5.3.3 Měření odchylek zobrazených hodnot

Tab. 5 Odchylyky zobrazených a předpokládaných rychlostí

$f_{osc}$ [Hz]	5	10,3	14,2	17	19,6	30	39,2	50	70	102
$v_{zobr}$ [km/h]	0,2	0,6	0,8	1,0	1,2	1,8	2,2	2,8	4,1	5,9
$v_{pred}$ [km/h]	0,3	0,6	0,8	1,0	1,1	1,7	2,3	2,9	4,0	5,9
$\Delta v$ [km/h]	0,09	-0,01	0,01	-0,02	-0,07	-0,07	0,06	0,09	-0,06	-0,01
$f_{osc}$ [Hz]	150	200	300	400	490	600	710	800	910	1010
$v_{zobr}$ [km/h]	8,7	11,4	17,3	23	28,1	34,4	41,1	46,4	52,5	58,2
$v_{pred}$ [km/h]	8,7	11,6	17,3	23,1	28,3	34,7	41,0	46,2	52,6	58,4
$\Delta v$ [km/h]	-0,03	0,15	0,03	0,11	0,21	0,26	-0,08	-0,18	0,07	0,15
$f_{osc}$ [kHz]	1,22	1,49	2,00	2,25	2,50	2,75	2,95	3,25	3,50	
$v_{zobr}$ [km/h]	70,0	86,3	115,8	130,0	144,3	158,5	170,7	188,6	201,8	
$v_{pred}$ [km/h]	70,5	86,1	115,5	130,0	144,4	158,9	170,4	187,8	202,2	
$\Delta v$ [km/h]	0,48	-0,22	-0,26	-0,02	0,13	0,37	-0,28	-0,85	0,40	

Vysvětlivky:

- $f_{osc}$  frekvence oscilátoru – vstupní signál,
- $v_{zobr}$  zobrazená rychlost v programu,
- $v_{pred}$  rychlost vypočítaná dle (1.4),
- $\Delta v$  odchylka naměřené a vypočítané rychlosti.

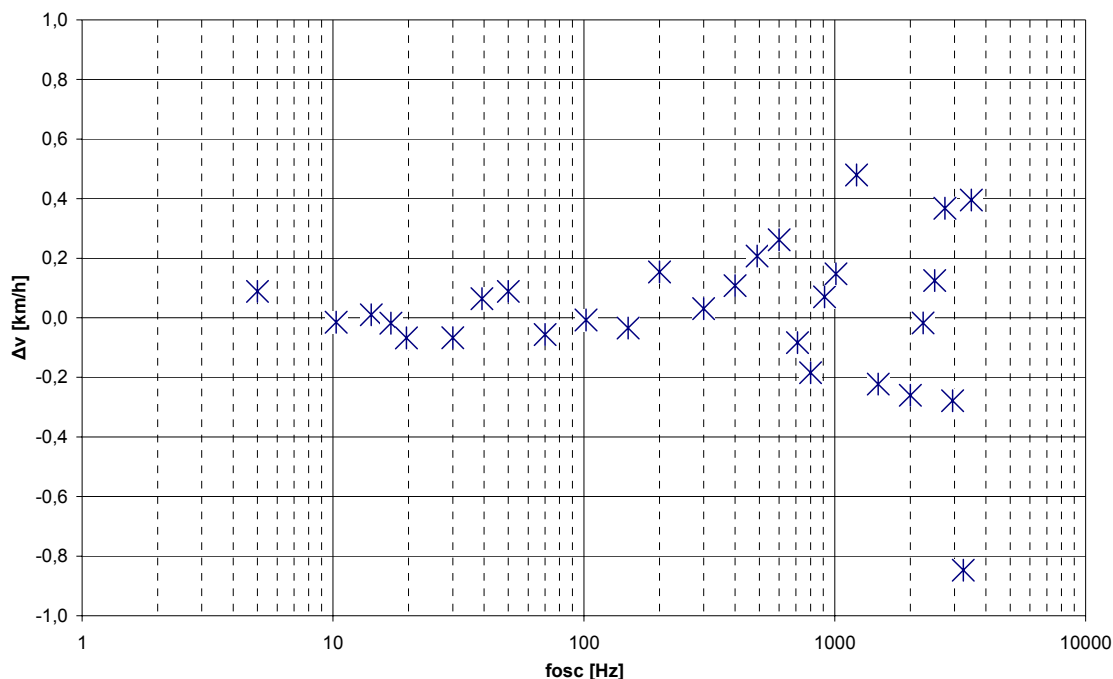
Tab. 6 Odchylky rychlosti pro obdélníkový a sinusový signál

$f_{osc}$ [Hz]	50	100	200	500	1k	2k	3k
Obdélník – $v_{zobr}$ [km/h]	2,8	5,9	11,4	28,7	58,0	116,4	104,4
Sinus – $v_{zobr}$ [km/h]	2,8	5,9	11,4	28,9	58,0	116,4	173,8

Měření odchylek zobrazených a předpokládaných rychlosti zobrazené v Tab. 5 a Obr. 5.21 ukazuje, že zobrazené chyby vypočítané rychlosti jsou menší než  $\Delta v = 1$  km/h. Chyby na nízkých frekvencích jsou způsobeny především frekvenčním krokem mezi jednotlivými spektrálními čarami. U vyšších frekvencí je však mimo této chyby i chyba samotného měření, jelikož zdroj harmonického signálů METEX MS9170 zobrazoval frekvenci pouze na dvě desetinná místa.

Na Tab. 6 jsou zobrazeny odchylky rychlostí mezi obdélníkovým a sinusovým signálem. Do frekvence  $f_{osc} = 2$  kHz jsou výsledky téměř totožné. Nad touto frekvencí se rychlost obdélníka místo zvyšování snižuje. Problém by vyřešil vložený antialiasingový filtr, který by nepropustil vysoká spektra.

Obě měření proběhla bez vstupního filtru, tj. připojením signálu přímo na AD převodník, pro napětí signálu  $U_{SIG} = 1$  V<sub>p-p</sub>. Změna velikosti špičkového signálu od 100 mV do 4,9 V nemělo na vyhodnocení vliv.



Obr. 5.21 Závislost odchylky naměřené a očekávané rychlosti na frekvenci



# ZÁVĚR

V první části práce jsem odvodil výpočet rychlosti z rozdílové frekvence na výstupu Dopplerovského čidla. Dále jsem popsal čidlo HB410, které je použito pro konečný výrobek. Jsou zde uvedeny tabulky s orientačními měřeními výstupního napětí a směrové charakteristiky čidla. V poslední úvodní kapitole popisují teoretickou digitalizace signálů.

V druhé části jsem nakreslil blokové schéma hardwarové části měřiče rychlosti a uvedl požadavky na jednotlivé bloky do jejich bližšího popisu. V části zabývající se mikrokontrolérem jsem popsal požadavky a uvedl možné typy pro realizaci. V tabulce jsem uvedl dva možné mikrokontroléry ATMEL, z nichž jeden je běžně používaný u nás a druhý, který by daleko více vyhovoval z hlediska nepotřeby externích periférií, není bohužel u nás dostupný.

V návrhové části jsou výpočty a podklady pro realizaci vstupních filtrů, obvodu AGC a mikroprocesorové části, ty vycházejí z požadavků v předchozí kapitole. Oba antialiasingové filtry byly realizovány na nepájivém poli a následně změřeny. Jak jsem uvedl již v textu, měřené vzorky nejsou tak dokonalé jak simulace v PSpice, což je způsobeno již reálnými vlastnostmi součástek. U měření prvního filtru jsem vycházel z optimalizace (v programu PSpice), kterou je eliminován překmit v přenosové charakteristice, místo hodnot součástek vypočtených. Číslicovou část jsem navrhl pro mikroprocesor ATMEGA16 s přídatnou pamětí SRAM. Toto řešení sice bylo sice o něco složitější na programování, ale vyhnul jsem se tím shánění nedostupného a drahého mikrokontroléru (v případě dovozu), jehož další integrované periférie bych v dané aplikaci zdaleka nevyužil.

Po úpravách některých chyb v analogové části (projekt MM2E), tj. použití RAIL-TO-RAIL operačních zesilovačů, místo varianty se zdrojem záporného napájecího napětí a integrovaného zesilovače AVC, jsem začal pracovat na programovém vybavení. Nejprve jsem navrhl program pro mikrokontrolér a komunikaci ověřoval přes terminál, zde jsem se dostal bez obtíží na rychlost přenosu 500 kBaud. Na rozdíl bezproblémově funkčního terminálu jsem v programu Matlab začal mít problémy s virtuálním sériovým portem, který po poslání více jak 1100 bytů nahlásil chybu a port zablokoval pro další komunikaci. Druhým problémem bylo, že pokud bych chtěl komunikovat s čidlem v reálném čase a zobrazovat hodnoty rychlosti v nějakém okně, bylo by třeba naprogramovat GUI prostředí, se kterým nemám žádné zkušenosti. Proto jsem se rozhodl vytvořit program vlastní, v jazyce C#, i přes neznalost jak tohoto potomka jazyka C, tak vývojového prostředí. Program je sice jednoduchý a FFT není tak propracované jako v Matlabu, ale s přenosem dat a nekonečnou smyčkou nemá problémy, navíc je dle mého názoru zpracování rychlejší.

U napsaného programu jsem provedl simulaci měření odchylky skutečné a zobrazené rychlosti. Toto měření je zatíženo chybou zvoleného funkčního generátoru, kde se mi na vyšších frekvencích nedařilo přesně odečíst frekvenci, která nebyla příliš stabilní, ale bohužel jiný generátor nebyl momentálně k dispozici. I přes to jsou výsledky slušné a chyba nebyla nepřesáhla 1 km/h. Dosah čidla se mi nepodařilo také přesvědčivě změřit, jelikož pro větší vzdálenosti byl šum čidla větší než detekovaný

signál – což může být způsobeno mou neodbornou opravou čidla – nahrazením shořeného vysokofrekvenčního tranzistoru zřejmě nekvalitní náhradou. Výstupní šum je navíc ovlivněn napájením, kdy pro napájení přes USB i přes vstupní tlumivku na vstupu a blokování všech aktivních prvků.

Při detekci pohybujících se automobilů jsem se setkal s dvěma problémy, které ovlivňovali detekci. Prvním je malý dosah čidla, tudíž lze detekovat pouze nejbližší pruh. Druhým je malá opakovací frekvence měření, které trvá okolo 0,6 až 0,7 s. Aby došlo k detekci, musí být čidlo relativně nízko nad zemí (asi 30 až 40 cm) a dobře nasměrováno (nejlépe na nárazník). Pokud jede více aut za sebou, pak detekuje to, které je nejbližší k čidlu v okamžiku vzorkování. Kvůli malému dosahu a nízké opakovací frekvenci se mi v pokusu podařilo změřit rychlost pouze 6 automobilů z 10. Daleko lepší výsledky má detekce rychlosti pohybu osoby (nebo např. automobilu), která drží (je na ni připevněno) čidlo a detekuje se rozdíl rychlosti se zemí. Avšak při tomto měření jsem měl problém zjistit korekční úhel, tudíž bych musel rychlost cejchovat (pomocí korekčního úhlu) s nějakým přesným zařízením, např. radarem ve vesnici (městě) nebo GPS modulem.

# LITERATURA

- [1] ŠEBESTA, J. *Radiolokace a radionavigace*. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2003
- [2] JAN, J. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů*. Brno: FEKT VUT v Brně, 1997. 438 s. ISBN 80-214-0816-2.
- [3] MANN, Burkhard. *C pro mikrokontroléry*. 1. vyd., Praha : BEN - technická literatura, 2004.
- [4] HÁZE, J.; VRBA R.; FUJČÍK L. *Teorie vzájemného převodu analogového a číslicového signálu*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [5] Atmel Corporation. *Datasheet ATmega16, Atmega16L*. 2009. 357 s, dostupné z WWW: <http://www.atmel.com>
- [6] Atmel Corporation. *Datasheet Atmega16U4, Atmega32U4*. 2009. 408 s, dostupné na WWW: <http://www.atmel.com>
- [7] Freescale semiconductors. *Datasheet MC9S08JM8, MC9S08JM16*. 2008. 386 s, dostupné na WWW: <http://www.freescale.com>
- [8] Freescale semiconductors. *Datasheet MC9S08JM60, MC9S08JM32*. 2009. 388 s, dostupné na WWW: <http://www.freescale.com>
- [9] Future Technology Devices International Ltd. *Datasheet FT232R USB UART IC*. 2008. 40 s, dostupné na WWW: <http://www.ftdichip.com>
- [10] Datasheet *HB410 - 9.35 GHz Microwave Motion Sensor Module*. 2 s, dostupné na WWW: [http://www.metronix.cz/hb410\\_eng.pdf](http://www.metronix.cz/hb410_eng.pdf)
- [11] Datasheet U6264A – Standard 8K x 8 SRAM. 1997. 9 s.
- [12] Punčochář, J. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd., Praha: BEN - technická literatura, 2002. 495 s. ISBN 80-7300-059-8.
- [13] Datasheet AD8664 - Low Noise, Precision 16 V CMOS, Rail-to-Rail Operational Amplifiers. 2006. 16 s, dostupné na WWW: <http://www.analog.com/>
- [14] Datasheet VCA2618 – Dual, VARIABLE GAIN AMPLIFIER with Input Buffer. 2003. 18 s, dostupné na WWW: <http://www.ti.com/>
- [15] PETRŽELA, J. *Přednáška BELF – základní pojmy*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009.
- [16] Texas Instrument. FilterPro – software pro návrh filtrů, dostupné na WWW: <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/filterpro.html>
- [17] RE, Chris; VOGELS, Werner. *FFT knihovna v C# – část programu SciMark2a*, dostupné na WWW: <http://math.nist.gov/scimark2/>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

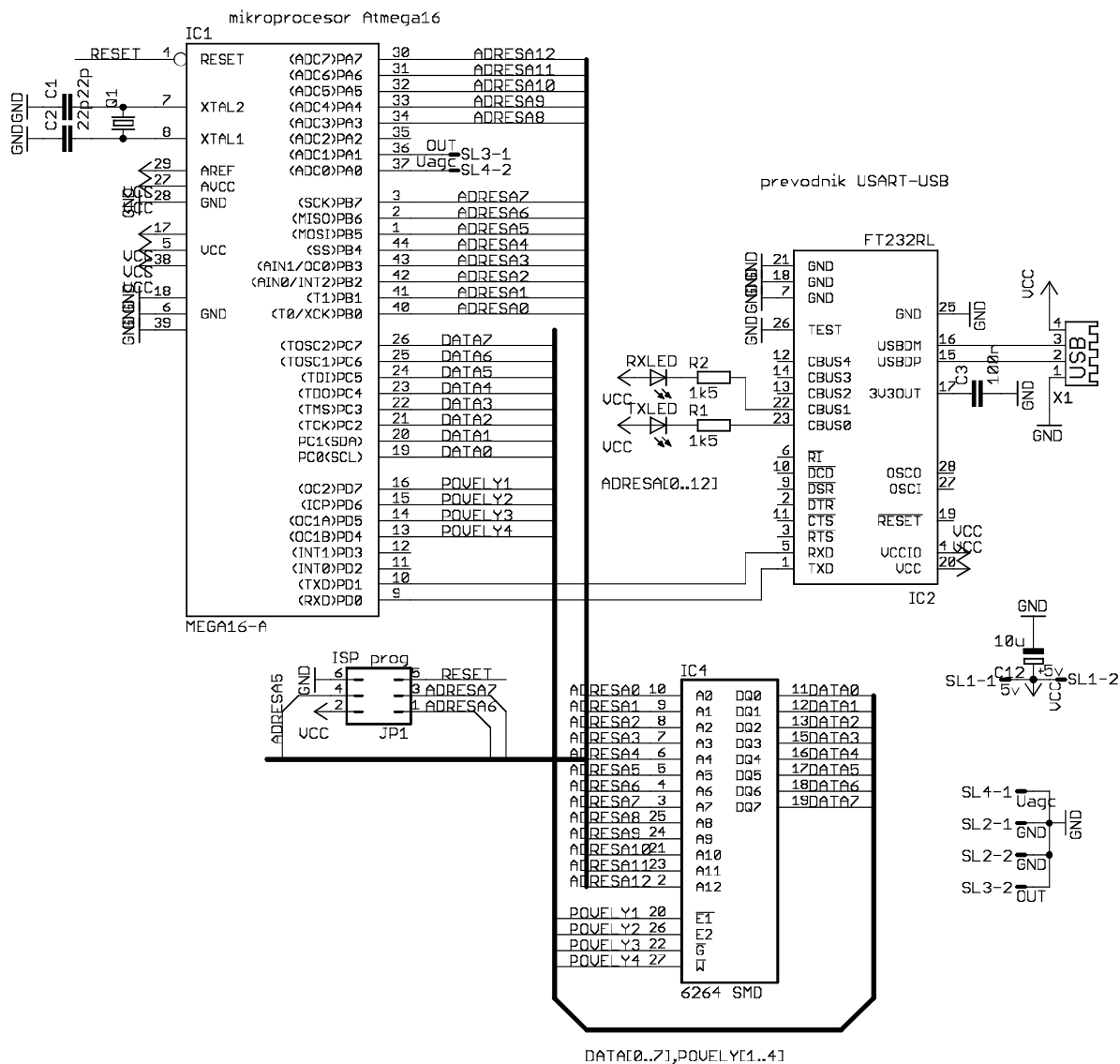
<i>ADC</i>	A/D Converter – Analogově-digitální převodník
<i>AGC</i>	Zesilovač s automatickým řízením zisku
<i>AVC</i>	Zesilovač s automatickým řízením zisku
<i>B</i>	Šířka pásma pro pokles zisku o 3dB
<i>c</i>	Rychlost světla ( $c = 3 \cdot 10^8$ )
<i>C<sub>pam</sub></i>	Velikost (kapacita) paměti
<i>DPS</i>	Deska plošných spojů
<i>f</i>	Frekvence – počet opakování periodického děje za jednotku času
<i>f<sub>vz</sub></i>	Vzorkovací frekvence
<i>IR</i>	Značení pro infračervené čidlo
<i>I/O</i>	Vstupně výstupní (zařízení nebo registr)
<i>OZ</i>	Operační zesilovač
<i>R</i>	Rezistivita nebo značení rezistoru
<i>RAM</i>	Voltaická paměť pro úschovu dat (podporuje čtení i zápis)
<i>nf</i>	Nízkofrekvenční – pohybující se v rozsahu 20 Hz ÷ 20 kHz
<i>SPI</i>	Sériové rozhraní
<i>SRAM</i>	Statická RAM paměť (nepotřebuje obnovu dat)
<i>USART</i>	Synchronní a asynchronní sériové rozhraní – použití v mikrokontrolérech
<i>USB</i>	Univerzální sériové rozhraní – I/O port na PC
<i>v</i>	Rychlost objektu
<i>VCA</i>	Zesilovač s říditelným ziskem (Voltage Controlled Amplifier)

# PŘÍLOHY

<b>A</b>	<b>Obvodová zapojení</b>	<b>43</b>
A.1	Schéma číslicové části .....	43
A.2	Schéma analogové části (s filtrem v.1) .....	44
A.3	Schéma analogové části (s filtrem v.2) .....	45
<b>B</b>	<b>Podklady pro výrobu</b>	<b>46</b>
B.1	DPS číslicová část – top (strana součástek) .....	46
B.2	DPS číslicová část – bottom (strana spojů) .....	46
B.3	DPS analogová část (filtr v.1) – top (strana součástek) .....	47
B.4	DPS analogová část (filtr v.1) – bottom (strana spojů) .....	47
B.5	DPS analogová část (filtr v.2) – top (strana součástek) .....	48
B.6	DPS analogová část (filtr v.2) – bottom (strana spojů) .....	48
<b>C</b>	<b>Osazovací výkresy a seznamy součástek</b>	<b>49</b>
C.1	Číslicová část - osazovací výkres – top (strana součástek) .....	49
C.2	Číslicová část - osazovací výkres – bottom (strana spojů) .....	49
C.3	Seznam součástek – číslicová část .....	50
C.4	Analogová část (v.1) – osazovací výkres - top .....	50
C.5	Analogová část (v.1) – osazovací výkres - bottom .....	51
C.6	Seznam součástek – analogová část (v.1) .....	51
C.7	Analogová část (v.2) – osazovací výkres - top .....	52
C.8	Analogová část (v.2) – osazovací výkres - bottom .....	52
C.9	Seznam součástek – analogová část (v.2) .....	53
<b>D</b>	<b>data ke grafům</b>	<b>54</b>
D.1	Frekvenční charakteristika filtru v.1 (Obr. 5.8) .....	54
D.2	Frekvenční charakteristika filtru v.2 (Obr. 5.10) .....	54
D.3	Pokusné měření vyzařovacího úhlu (Obr. 2.1) .....	54
<b>E</b>	<b>fotopříloha</b>	<b>55</b>

# A OBVODOVÁ ZAPOJENÍ

## A.1 Schéma číslicové části



## Dopplers analog v1.3



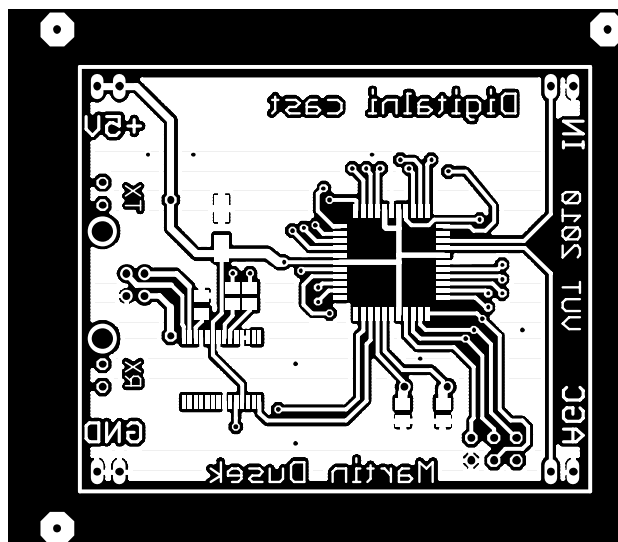
## Analogova cast v.1.4





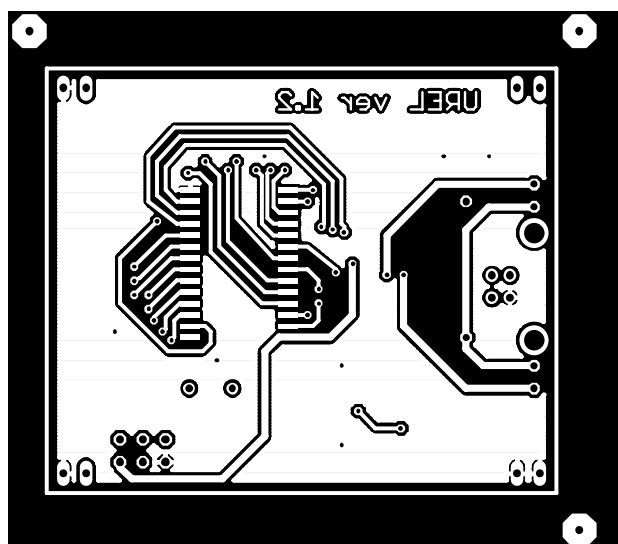
## B PODKLADY PRO VÝROBU

### B.1 DPS číslicová část – top (strana součástek)



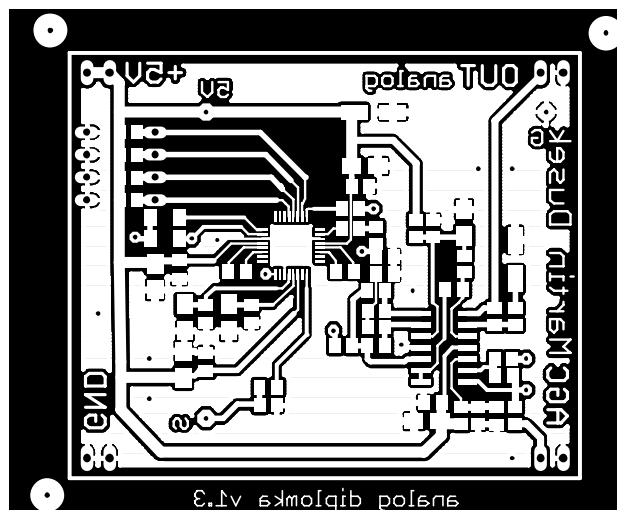
Rozměr desky 57,2 x 48,3 [mm], měřítko M1:1

### B.2 DPS číslicová část – bottom (strana spojů)



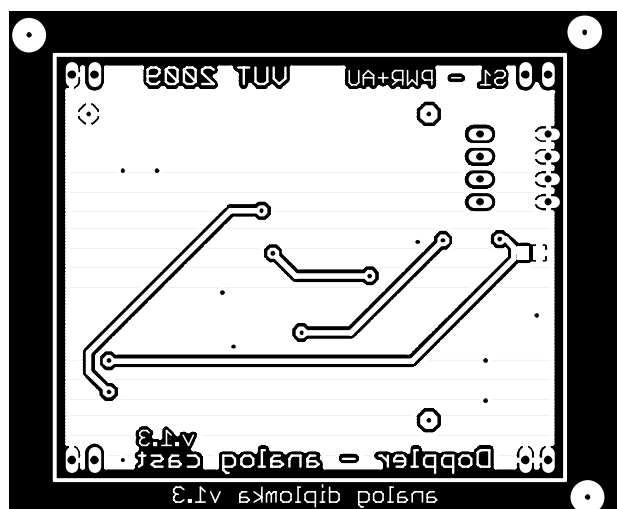
Rozměr desky 57,2 x 48,3 [mm], měřítko M1:1

### B.3 DPS analogová část (filtr v.1) – top (strana součástek)



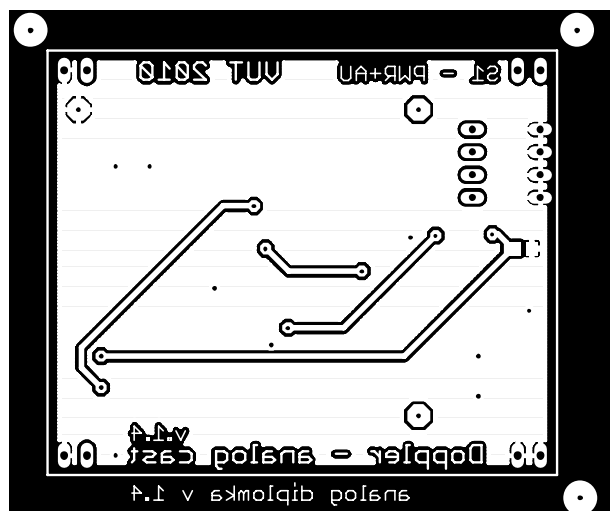
Rozměr desky 57,8 x 48,3 [mm], měřítko M1:1

## B.4 DPS analogová část (filtr v.1) – bottom (strana spojů)



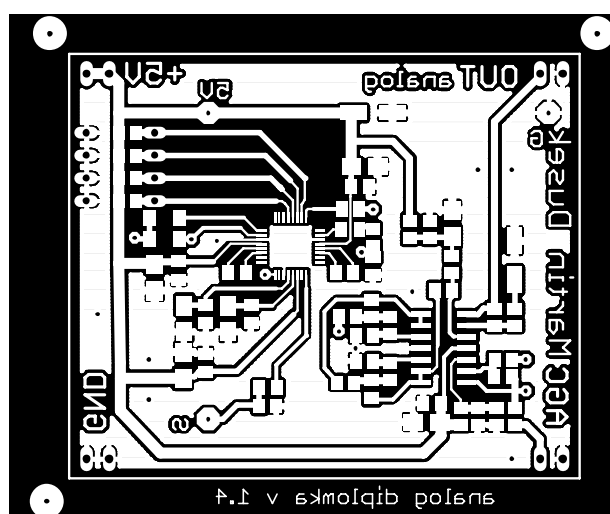
Rozměr desky 57,8 x 48,3 [mm], měřítko M1:1

## B.5 DPS analogová část (filtr v.2) – top (strana součástek)



Rozměr desky 57,8 x 48,3 [mm], měřítko M1:1

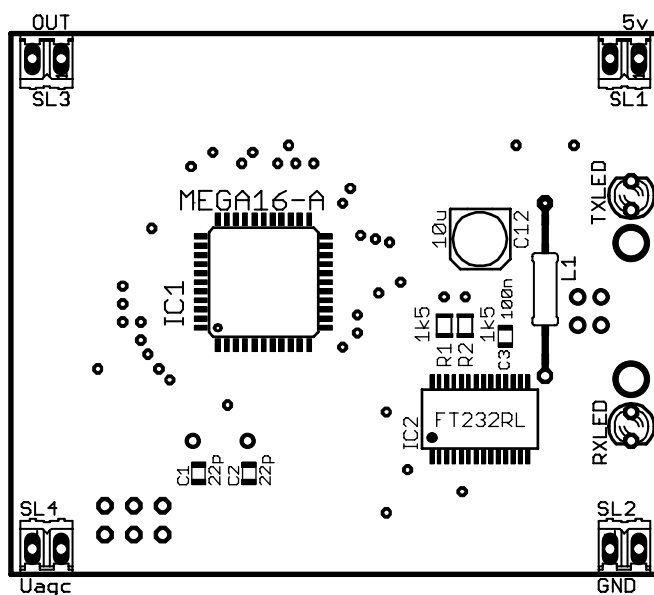
## B.6 DPS analogová část (filtr v.2) – bottom (strana spojů)



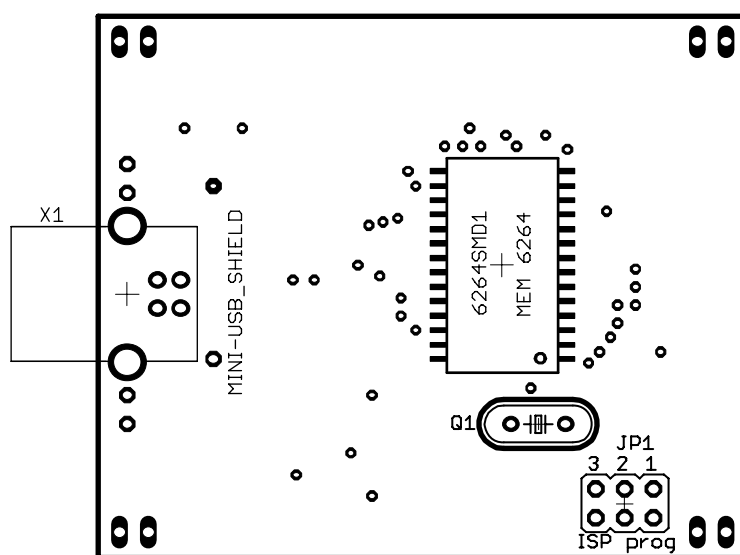
Rozměr desky 57,8 x 48,3 [mm], měřítko M1:1

## C OSAZOVACÍ VÝKRESY A SEZNAMY SOUČÁSTEK

### C.1 Číslicová část - osazovací výkres – top (strana součástek)



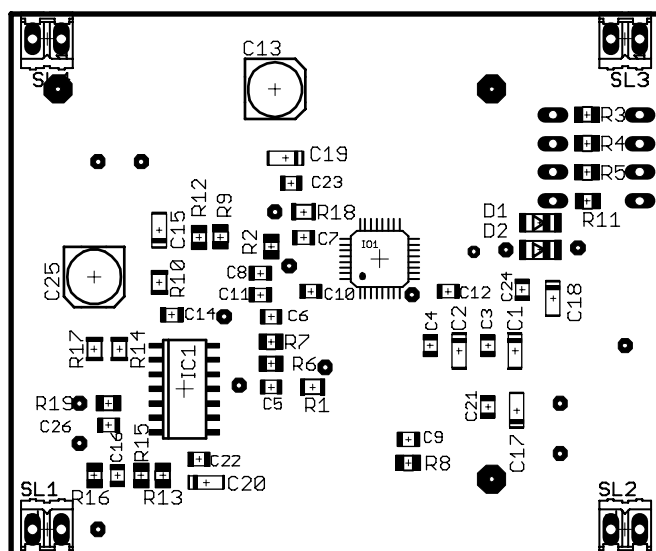
### C.2 Číslicová část - osazovací výkres – bottom (strana spojů)



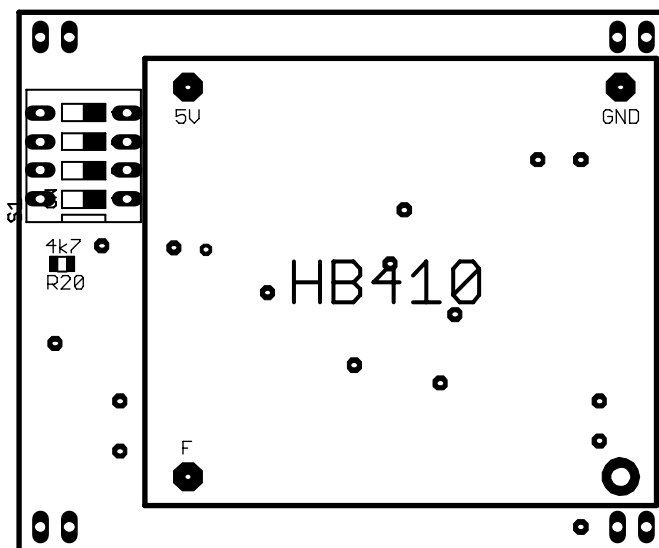
### C.3 Seznam součástek – číslicová část

Název	Hodnota	Detail, pouzdro	Počet
C1, C2	22p	C-EUC0805K	2
C12	10u	CPOL-EU153CLV-0505	1
C3	100n	C-EUC0805K	1
IC1	MEGA16-A	MEGA16-A	1
IC2	FT232RL	LD-SSOP28	1
IC4	6264 SMD	SOP28	1
JP1	-	JP3Q	1
L1		L-EU0207/15 (L-EU)	1
Q1	12 MHz	CRYSTALHC49S	1
R1, R2	1k5	R-EU_M0805	2
RXLED, TXLED	2mA	LED3MM	2
SL1,SL2,SL3,SL4	-	M02S	4
X1	-	MINI-USB-DPS	1

### C.4 Analogová část (v.1) – osazovací výkres - top



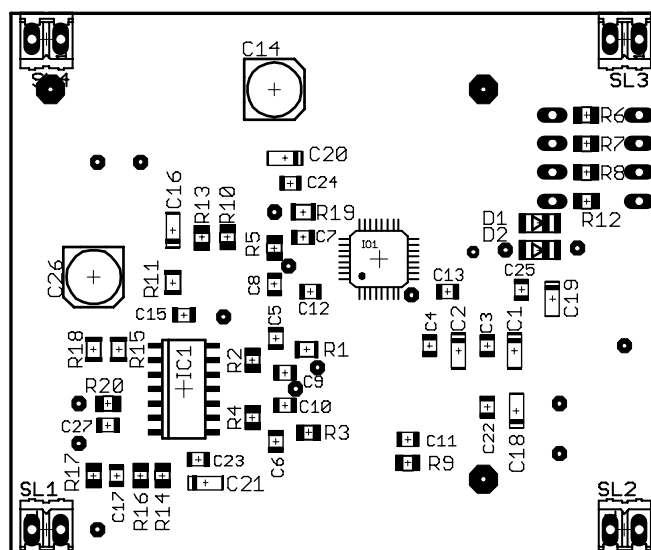
## C.5 Analogová část (v.1) – osazovací výkres - bottom



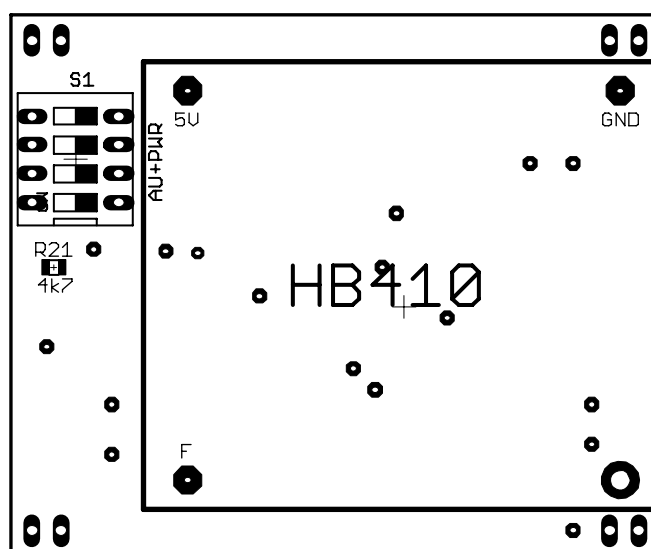
## C.6 Seznam součástek – analogová část (v.1)

Název	Hodnota	Detail, pouzdro	Počet
C1, C2, C15, C17, C18, C19, C20	1u/16V	CPOL-EUA/3216-18W	7
C13, C25	10u/16V	CPOL-EU153CLV-0505	2
C3, C4, C16, C21, C22, C23, C24, C26	100n	C-EUC0805K	8
C5, C6, C8, C11	1n5	C-EUC0805K	4
C7, C9, C10, C12, C14	33n	C-EUC0805K	5
CI1	HB410	DOPPLER SENZOR	1
D1, D2	1N4148	SOD80C	2
IC1	AD8664	SO14	1
IO1	VCA2618	PQFP32	1
R1, R14	24k	R-EU_M0805	2
R10	470k	R-EU_M0805	1
R13	51k	R-EU_R0805	1
R15	39k	R-EU_R0805	1
R16, R18	2k	R-EU_R0805	2
R17	2k4	R-EU_M0805	1
R19	330k	R-EU_R0805	1
R2, R3, R4, R5, R9, R11, R12	10k	R-EU_R0805	7
R20	4k7	R-EU_R0805	1
R6, R7	24k	R-EU_R0805	2
R8	12k	R-EU_R0805	1
S1		DS04E	1
SL1, SL2, SL3, SL4		M02S	4

## C.7 Analogová část (v.2) – osazovací výkres - top



## C.8 Analogová část (v.2) – osazovací výkres - bottom



## C.9 Seznam součástek – analogová část (v.2)

Název	Hodnota	Detail, pouzdro	Počet
C1, C2, C16, C18, C19, C20, C21	1u/16V	CPOL-EUA/3216-18W	7
C10	680p	C-EUC0805K	1
C14, C26	10u/16V	CPOL-EU153CLV-0505	2
C3, C4, C17, C22, C23, C24, C25, C27	100n	C-EUC0805K	8
C5	4n7	C-EUC0805K	1
C6	15n	C-EUC0805K	1
C7, C11, C12, C13, C15	33n	C-EUC0805K	5
C8, C9	1n5	C-EUC0805K	2
CI1	HB410	DOPLER	1
D1, D2	1N4148	SOD80C	2
IC1	AD8664	SO14	1
IO1	VCA2618	PQFP32	1
R1	4k7	R-EU_M0805	1
R11	470k	R-EU_M0805	1
R14	51k	R-EU_R0805	1
R15	24k	R-EU_M0805	1
R18	2k4	R-EU_M0805	1
R17, R19	2k	R-EU_M0805	2
R2	47k	R-EU_R0805	1
R20	330k	R-EU_R0805	1
R21	4k7	R-EU_R0805	1
R3	3k9	R-EU_R0805	1
R4, R16	39k	R-EU_R0805	2
R5, R6, R7, R8, R10, R12, R13	10k	R-EU_R0805	7
R9	12k	R-EU_R0805	1
S1	AU+PWR	DS04E	1
SL1, SL2, SL3, SL4		M02S	4



## D DATA KE GRAFŮM

### D.1 Frekvenční charakteristika filtru v.1 (Obr. 5.8)

f [Hz]	10	20	30	50	70	100	200	300	500	700	1000
A [dB]	19	20	20,1	20,5	20,6	20,6	20,6	20,6	20,55	20,5	20,5
f [kHz]	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5
A [dB]	20,5	20,4	20,1	19,7	19	18	17,7	17,4	17	16,7	16,5
f [kHz]	48	5	6	7	10	15	20	40	100	200	500
A [dB]	15,5	14	11	7	-1,5	-10,5	-12,5	-13,5	-16	-18	-16

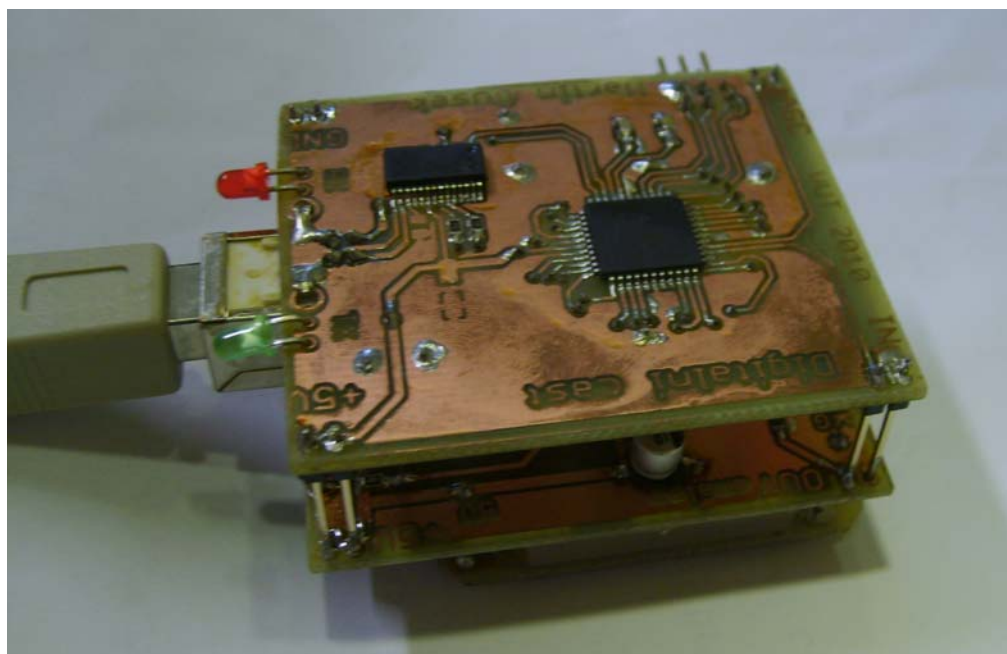
### D.2 Frekvenční charakteristika filtru v.2 (Obr. 5.10)

f [Hz]	10	20	30	50	70	100	200	300	500	700	1000	1500
A [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,1	-0,2	-0,4
f [kHz]	2	2,5	3	3,2	3,5	3,7	4	4,2	4,4	4,6	4,8	5
A [dB]	-0,8	-1,4	-2	-2,4	-3	-3,6	-4,8	-5,5	-6,7	-8	-9,2	-10,4
f [kHz]	5,2	5,5	6	7	10	15	20	30	40	50	70	100
A [dB]	-12	-14	-17	-23	-36	-49	-57	-59	-59	-60	-60	-60

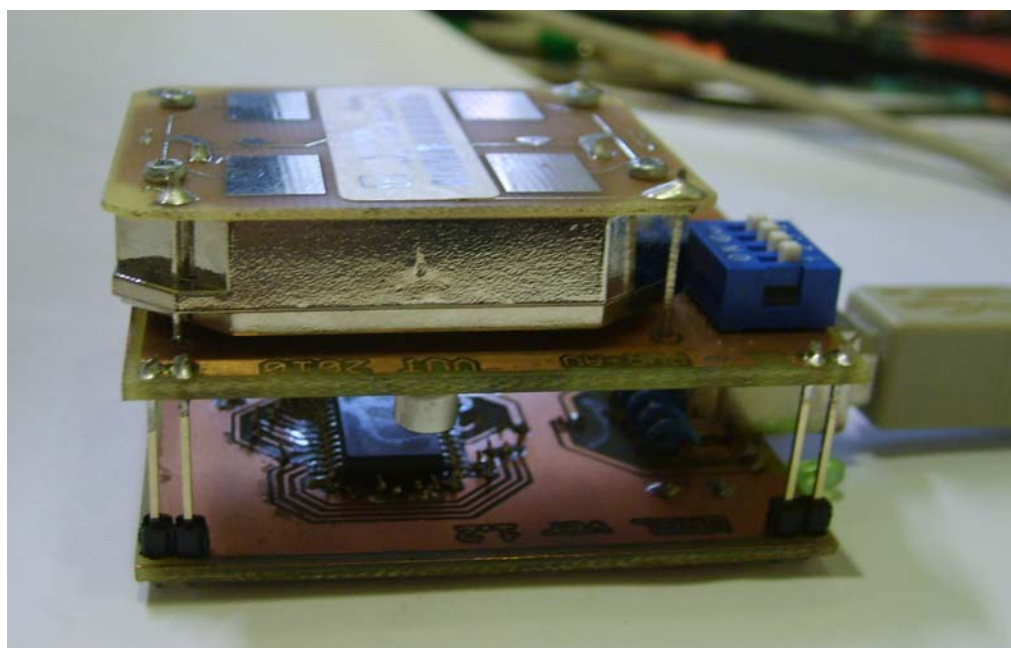
### D.3 Pokusné měření vyzařovacího úhlu (Obr. 2.1)

Vyzařovací úhel – vertikálně:						Vyzařovací úhel – horizontálně:					
Úhel [°]	1.měř [mV]	2.měř [mV]	3.měř [mV]	Průměr [mV]	A[dB]	Úhel [°]	1.měř [mV]	2.měř [mV]	3.měř [mV]	Průměr [mV]	A[dB]
0	102,5	101	100,3	101,3	0,00	0	85	83,3	84,3	84,2	0,00
10	94,3	91,2	91,5	92,3	-0,40	10	75,6	71,8	74,3	73,9	-0,57
20	85,3	81,8	84,3	83,8	-0,82	20	58,2	55,6	56,9	56,9	-1,70
30	71,3	74,3	74,2	73,3	-1,41	30	38,1	36,2	34,3	36,2	-3,67
40	58,7	54,3	56,3	56,4	-2,54	40	23,7	25	23,1	23,9	-5,46
45	54,2	50,1	48,3	50,9	-2,99	-10	66,2	68,3	67,7	67,4	-0,97
50	45,0	44,2	44,8	44,7	-3,55	-20	46,6	48,3	47,5	47,5	-2,49
60	28,1	31,2	35,1	31,5	-5,08	-30	30,5	32,8	31,8	31,7	-4,24
-10	98,3	93,7	96,8	96,3	-0,22	-40	13,1	14,6	12,8	13,5	-7,95
-20	83,8	83,2	84,3	83,8	-0,82						
-30	75,2	78,3	74,5	76,0	-1,25						
-40	57,3	61,8	59,2	59,4	-2,31						
-45	53,2	50,8	54,3	52,8	-2,83						
-50	44,9	42,5	44,5	44,0	-3,62						
-60	34,8	33,1	34,2	34,0	-4,74						

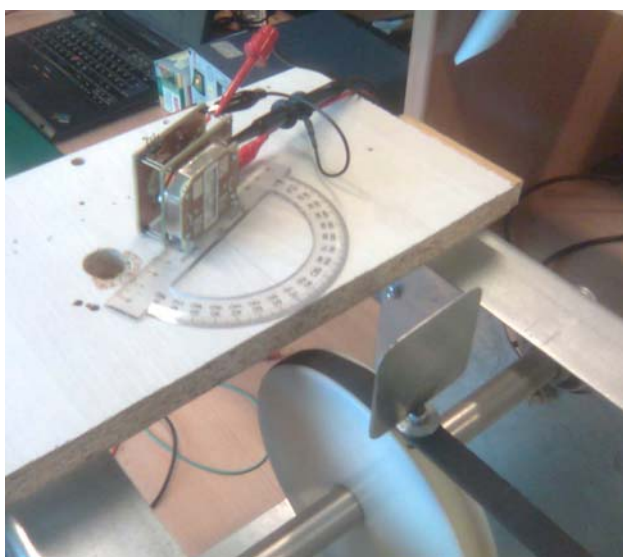
## E FOTOPŘÍLOHA



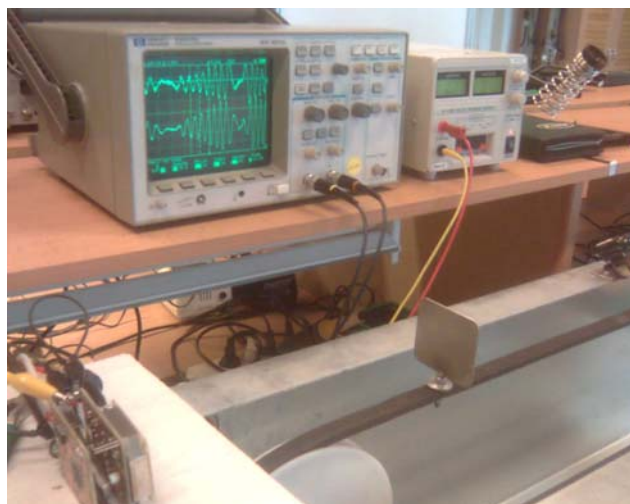
Realizace zařízení – pohled zespoda



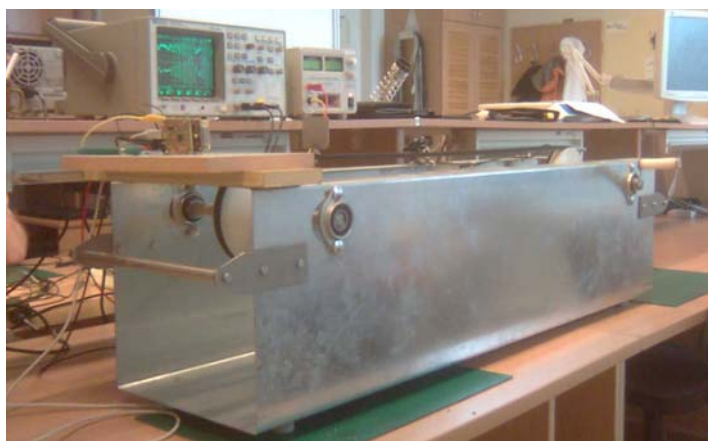
Realizace zařízení – pohled zestrany



Realizace pokusného měření vyzařovacího úhlu



Pohled na měřicí pracoviště – měření výstupního napětí



Posuvník s lopatkami použitý pro experimentální měření